

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**CARLOS ALFREDO GRACIOLI AITA**

**ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE JUNTAS SOLDADAS PELO  
PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA  
(FSSW) DA LIGA AA6060-T5**

**Alegrete**

**2017**

**CARLOS ALFREDO GRACIOLI AITA**

**ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE JUNTAS SOLDADAS PELO  
PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA  
(FSSW) DA LIGA AA6060-T5**

Qualificação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia – PPEng da Universidade Federal do Pampa, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

**Alegrete**

**2017**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo (a) autor (a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais).

A311e Aita, Carlos Alfredo Gracioli  
ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE  
JUNTAS SOLDADAS PELO PROCESSO DE  
SOLDAGEM A PONTO POR FRICÇÃO E MISTURA  
MECÂNICA (FSSW) DA LIGA AA6060-T5 / Carlos  
Alfredo Gracioli Aita.  
103 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do  
Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIAS, 2017.  
"Orientação: Tonilson de Souza Rosendo".

1. Soldagem. 2. FSSW. 3. Resistência ao  
cisalhamento. 4. DOE. I. Título.

CARLOS ALFREDO GRACIOLI AITA

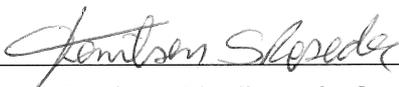
ESTUDO DO DESEMPENHO MECÂNICO DE JUNTAS SOLDADAS PELO  
PROCESSO DE SOLDAGEM A PONTO POR FRICÇÃO E MISTURA MECÂNICA  
(FSSW) DA LIGA AA6060-T5

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia – PPEng da Universidade Federal do Pampa, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração: Tecnologia de Materiais.

Dissertação defendida e aprovada em 17 de Agosto de 2017.

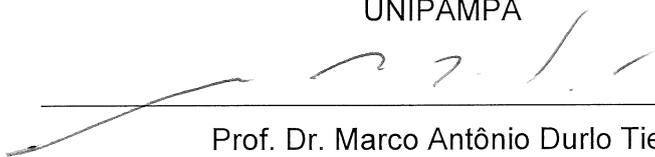
Banca examinadora:



Prof. Dr. Tonilson de Souza Rosendo

Orientador

UNIPAMPA



Prof. Dr. Marco Antônio Durlo Tier

UNIPAMPA



Prof. Dr. Afonso Reguly

UFRGS



Prof. Dr. Ana Cláudia Costa de Oliveira

UNIPAMPA

Dedico este trabalho à minha família!

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à Deus por sempre estar comigo me mostrando os caminhos e decisões a serem tomadas.

Aos meus pais e minhas irmãs por sempre estarem ao meu lado.

À Jéssica, minha noiva, pelo apoio e companheirismo.

Um agradecimento especial ao meu orientador, Professor Tonilson Rosendo, que esteve sempre presente em todas as etapas desse trabalho.

Ao professor Aldoni Wiedenhofst pela ajuda na realização das soldagens, sem os seus “macetes” tudo seria mais difícil.

À Isadora Góss pela ajuda na preparação das amostras e ensaios.

Ao Professor Marco Tier pelas contribuições.

Ao LAMEF – UFRGS, em especial, Professor Afonso e ao Engenheiro Márcio.

Aos Colegas dos laboratórios, pelos galhos quebrados, Ivan e Milene e em especial ao Dieison pelo incentivo de começar o mestrado.

À UNIPAMPA, que me proporcionou a participação neste curso de Mestrado juntamente com minhas atividades como servidor.

A todos que de forma direta ou indireta me ajudaram nesta caminhada.

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”

Albert Einstein

## RESUMO

A Soldagem Ponto Fricção e Mistura Mecânica (Friction Stir Spot Welding - FSSW) é uma técnica de soldagem para união pontual de juntas sobrepostas no estado sólido. Por não envolver fusão das chapas que estão sendo soldadas, proporciona melhores propriedades mecânicas em comparação com a soldagem convencional. Outras vantagens são pouca distorção térmica, não necessidade de preparação da superfície e não geração de fumos (tecnologia limpa), o que vem tornando o processo atrativo para a indústria automotiva. Neste trabalho foi feito um estudo do desempenho mecânico de juntas sobrepostas soldadas pelo processo FSSW da liga AA6060-T5. Propriedades metalúrgicas e mecânicas de juntas FSSW em chapas de 3,2 mm de espessura foram investigadas, em termos de dureza, resistência ao cisalhamento, macroestrutura e área soldada. Planejamento de experimentos (DOE) foi implementado, pelo Método Taguchi, para determinar as combinações de parâmetros de soldagem a serem testadas e para a interpretação dos resultados. Os parâmetros de processo estudados foram velocidade de rotação, tempo de permanência e velocidade de penetração, em três níveis cada, formando uma matriz ortogonal L9. Com os resultados do Método Taguchi foram escolhidos os dois parâmetros mais significativos e aplicou-se um planejamento Fatorial completo  $2^3$ . Para cada condição de soldagem, foram produzidas quatro amostras, uma para avaliação macroestrutural e microdureza e três para testes mecânicos de cisalhamento. Os resultados mostraram que soldas de qualidade são possíveis para a liga e equipamentos usados nesse estudo. Resistências ao cisalhamento superiores a 2,4kN foram observadas, associadas a longos tempo de soldagem. O tempo de permanência e a velocidade de rotação são os parâmetros de maior influência na resistência ao cisalhamento. Os tempos de soldagem muito longos causam diminuição da resistência ao cisalhamento devido a ascentuação do gancho. O aumento da velocidade de rotação leva ao fenômeno de transição chamado de stick/slip, o que limita a sua magnitude. Equações empíricas para prever a força de cisalhamento em função dos parâmetros de soldagem são satisfatórias quando obtidas por interpolação quadrática.

Palavras chave: Soldagem, FSSW, DOE – Taguchi, Resistência ao cisalhamento

## ABSTRACT

The Friction Stir Spot Welding (FSSW) is a welding technology to produce overlap spot joints in the solid state. The absence of bulk melting leads to enhanced mechanical properties in comparison to conventional welding. Other advantages are little thermal distortion, no need of surface preparation and no fumes (clean technology), all contributing to the attractiveness of this process in the industry, specially the automotive. This work aimed the study of the mechanical performance of FSSW joints produced with the AA6060-T5. Mechanical and metallurgical properties of FSSW produced in sheets 3,2mm thick were investigated, in terms of hardness, shear tensile strength, macrostructure and welded area. Design of Experiments (DOE) was applied by means of the Taguchi Method to determine the welding parameters to be tested and to understand the results. The welding parameters tested were rotational speed, dwell time and plunge rate, three levels each which led to a L9 orthogonal matrix (9 welding configurations). With results of the Taguchi Method, the two welding parameters more significant (dwell time and rotational speed) were selected for a complete factorial  $2^3$  assessment. For each welding configuration five samples were produced, one for macrostructural and hardness assessment and four for mechanical tests. The results showed that sound welds are possible with the selected alloy and welding equipment. Shear strength higher than 2,4kN, was observed, associated to long welding time. The dwell time and rotational speed are the parameters most effective on the joint shear strength. Too long welding times lead to poor joint strength due to the hook. There is a limit to the rotational speed associated to the transition phenomenon known as slick/slip. Empirical equations for predicting joint strength in terms of welding parameters were successfully obtained by quadratic interpolation.

Keywords: Welding, FSSW, DOE – Taguchi, Shear strength

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática do processo FSW: (a) configuração das chapas e da ferramenta (b) cordão de solda.....	25
Figura 2 - Estágios da Soldagem FSSW.....	26
Figura 3 - Macrografia de uma solda FSSW, mostrando as zonas da solda e a interface entre as chapas.....	28
Figura 4 - Ilustração esquemática da seção transversal de uma junta FSSW .....	29
Figura 5 - Força axial em função de: (a) rotação e (b) velocidade de penetração ....	31
Figura 6 – Curva tensão x deformação liga de alumínio 6060-T5.....	33
Figura 7 - Gráfico dos efeitos principais dos dados da Tabela 2.....	35
Figura 8 - Fluxograma de atividades .....	37
Figura 9 – Representação esquemática dos corpos de prova mostrando as dimensões da junta soldada .....	38
Figura 10 - Desenho e dimensões dos corpos de provas produzidos para ensaio de tração de caracterização do metal base.....	39
Figura 11 - Curva tensão x alongamento medida experimentalmente para o metal base .....	39
Figura 12 - (a) Desenho do gabarito de soldagem (b) Montagem do sistema no centro de usinagem CNC .....	40
Figura 13 - Centro de usinagem Romi D800 utilizado para a soldagem .....	40
Figura 14 – Ferramenta de soldagem: .....	41

Figura 15 - Aplicação dos CP's .....	44
Figura 16 - Disposição dos termopares para medição de temperatura.....	45
Figura 17 - Sistema de medição da força axial de soldagem.....	45
Figura 18 – Ensaio de cisalhamento: (a) representação esquemática e (b) foto de um ensaio em andamento.....	46
Figura 19 – Medição dos perfis de microdureza: (a) microdurômetro Buehler Micromet 6010 e (b) esquema da seção transversal da solda mostrando a distribuição dos pontos de medição.....	47
Figura 20 - (a) Cortadora metalográfica de precisão Buehler modelo Isomet 4000 e em (b) Corte sendo realizado .....	48
Figura 21 – Lupa Olympus SZ-CTV com interface computadorizada para captura de imagens.....	48
Figura 22 - Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA10.....	49
Figura 23 - Medição da área da ZM utilizando o software Solid Works.....	50
Figura 24 - Medição da largura da ZM com auxílio do software Solid Works.....	50
Figura 25 - Junta sobreposta obtida pelo processo FSSW. ....	52
Figura 26 – Resistência ao cisalhamento em termos da carga máxima medida nos ensaios de cisalhamento – Testes de Taguchi.....	54
Figura 27 – Análise sinal/ruído do método Taguchi - gráficos dos efeitos principais para: (a) média das médias e (b) média da taxa S/R. ....	55
Figura 28 - Superfícies de resposta para modelo quadrático simplificado – testes de Taguchi .....	58

Figura 29 - Resistência ao cisalhamento em termos da carga máxima medida nos ensaios de cisalhamento – Fatorial completo.....	60
Figura 30 - Superfície de resposta – Fatorial completo.....	62
Figura 31 – Análise individual do efeito dos parâmetros na carga máxima suportada .....	62
Figura 32 - Perfil de temperatura vs Tempo (Combinação 18 – 2500/4).....	63
Figura 33 - Temperatura máxima medida - Pino e Ombro .....	64
Figura 34 - Superfície de resposta para temperatura (a) do ombro (b) do pino .....	66
Figura 35 - Perfil de força axial no processo de soldagem (Combinação 12: 1500/4) .....	67
Figura 36 - Força axial máxima para cada combinação de soldagem .....	68
Figura 37 - Macrografia de um ponto de solda (1500/4) .....	69
Figura 38 - Macrografias de todas as combinações.....	70
Figura 39 – Demonstração da medição da largura soldada e parcialmente soldada	71
Figura 40 - Perfil de microdureza da amostra 10 (1500/0) .....	72
Figura 41 - Perfil de microdureza da amostra 11 (1500/2) .....	72
Figura 42 - Perfil de microdureza da amostra 12 (1500/4) .....	73
Figura 43 - Perfil de microdureza da amostra 13 (2000/0) .....	73
Figura 44 - Perfil de microdureza amostra 14 (2000RPM/2s) .....	73
Figura 45 - Perfil de microdureza da amostra 15 (2000/4) .....	74
Figura 46 - Perfil de microdureza da amostra 16 (2500/0) .....	74

Figura 47 - Perfil de microdureza da amostra 17 (2500/2) .....	74
Figura 48 - Perfil de microdureza amostra 18 (2500/4s) .....	75
Figura 49 - Medida das regiões soldada e parcialmente soldada: (a) amostra 12 (1500/4) e (b) amostra 16 (2500/0) .....	75
Figura 50 - Diferenças entre os ganchos entre as amostras: (a) combinação 12 - 1500/4 e (b) combinação 16 - 2500/0.....	77
Figura 51 - Comparação do gráfico de força vs alongamento das amostras 12 e 16	78
Figura 52 - Fratura da amostra 10 (1500/0) .....	80
Figura 53 – Fratura da amostra 12 (1500/4) .....	80
Figura 54 - Modo de falha - Fratura cisalhante.....	81
Figura 55 - (a) Zonas de transição da fratura da amostra 10 (b) dimples (c) fratura na zona parcialmente soldada.....	82
Figura 56 - (a) Zonas de transição da fratura da amostra 12 (b) fratura na zona parcialmente soldada (c) dimples.....	83
Figura 57 - Para as velocidades de rotação de 2000 e 2500RPM observou-se a ocorrência do fenômeno stick/slip, que leva à redução da área soldada. ....	90

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química da liga 6060-T5 .....	32
Tabela 2 - Tabela de resposta para nível ótimo em um processo com três variáveis .....	34
Tabela 3 - Composição química da liga AA6060-T5 (metal base) .....	38
Tabela 4 - Tabela de parâmetros .....	42
Tabela 5 - Combinações de parâmetros aplicando o método de Taguchi .....	43
Tabela 6 - Combinações de fatorial completo $2^3$ .....	43
Tabela 7 - Resultados de ensaio de cisalhamento – combinações de Taguchi .....	53
Tabela 8 - Resultados da análise do Método Taguchi – Média e Razão S/R .....	56
Tabela 9 - Tabela ANOVA para o efeito dos parâmetros de soldagem na resistência ao cisalhamento – testes de Taguchi .....	56
Tabela 10 - Resumo do modelo linear .....	57
Tabela 11 - Resumo do modelo quadrático modificado .....	57
Tabela 12 - Resultados de ensaio de cisalhamento – Fatorial completo .....	60
Tabela 13 - Tabela ANOVA para o efeito dos parâmetros de soldagem na resistência ao cisalhamento – Fatorial completo .....	61
Tabela 14 - Resumo do modelo quadrático simplificado – Fatorial completo .....	61
Tabela 15 - Temperatura máxima pino e ombro .....	64
Tabela 16 - ANOVA temperatura do ombro .....	65
Tabela 17 - ANOVA temperatura pino.....	65

Tabela 18 - Resumo modelo temperatura do pino .....	66
Tabela 19 - Resumo modelo temperatura do ombro .....	66
Tabela 20 - Resultados da força axial de soldagem.....	68
Tabela 21 - Largura da zona soldada e parcialmente soldada.....	71
Tabela 22 - Teste de confirmação da combinação ótima.....	86
Tabela 23 - Validação do modelo empírico resultante da superfície de resposta do método Taguchi.....	87
Tabela 24 - Validação do modelo empírico resultante da superfície de resposta do fatorial completo .....	88
Tabela 25 - Tabela das soldagens de teste para TP de 3s .....	89

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	– Altura do gancho
ANOVA	– Análise de variância
CP	– Corpo de prova
DO	– Diâmetro do ombro
DOE	– Design of Experimentos
DOF	– Graus de liberdade (Degree of Freedom)
DP	– Diâmetro do pino
EC	– Espessura da chapa
EEC	– Espessura efetiva da chapa
FSSW	– Friction Stir Spot Welding
FSW	– Friction Stir Welding
GPa	– Giga Pascal
HRC	– Hardness Rockwell C
LAMEF	– Laboratório de Metalurgia Física
MB	– Metal base
MEV	– Microscópio eletrônico de varredura
MF	– Mergulho da ferramenta
MO	– Microscópio óptico
MPa	– Mega Pascal
RPM	– Rotações por minuto
RPS	– Região parcialmente soldada
RSC	– Região de soldagem completa
RSS	– Região sem soldagem
S/R	– Taxa sinal ruído

S/N – Signal-to-noise ratio

TP – Tempo de permanência

TWI – The Welding Institute

VP – Velocidade de penetração

VR – Velocidade de rotação

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UNIPAMPA – Universidade Federal do Pampa

ZM – Zona de mistura

ZTA – Zona termicamente afetada

ZTMA – Zona termo mecanicamente afetada

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	21
1.1	Objetivo Geral .....	23
1.2	Objetivos específicos .....	23
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	24
2.1	Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica .....	24
2.2	Soldagem Ponto por Fricção e Mistura Mecânica .....	26
2.2.1	Microestrutura no processo FSSW .....	27
2.2.2	Temperatura no processo FSSW .....	30
2.2.3	Força axial no processo FSSW .....	31
2.3	Liga de alumínio 6060-T5 .....	32
2.4	Método Taguchi .....	33
2.5	Contexto atual da soldagem no estado sólido .....	36
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	37
3.1	Material das amostras .....	38
3.2	Equipamento de soldagem .....	40
3.3	Ferramenta de soldagem .....	41
3.4	Parâmetros de soldagem .....	42
3.4.1	Planejamento experimental – Método Taguchi .....	42
3.4.2	Planejamento experimental – Fatorial completo .....	43
3.5	Monitoramento do processo .....	44

3.5.1	Medição de temperatura .....	44
3.5.2	Medição de força axial de soldagem .....	45
3.6	Caracterização mecânica .....	46
	Posteriormente as soldagens, as amostras foram submetidas a caracterizações mecânicas e metalúrgicas com a finalidade de caracterizar o desempenho mecânico das juntas as características gerais da união. ....	46
3.6.1	Ensaio de cisalhamento .....	46
3.6.2	Microdureza .....	47
3.7	Caracterização metalúrgica .....	47
3.7.1	Macrografia .....	47
3.7.2	Análise de falhas .....	49
3.7.3	Medição da área cisalhada .....	49
3.7.4	Medição da área soldada e parcialmente soldada .....	49
3.7.5	Medição da zona de mistura e largura soldada + parcialmente soldada...	50
3.8	Análise dos resultados .....	51
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>52</b>
4.1	Ensaio de cisalhamento .....	52
4.1.1	Ensaio de cisalhamento – Combinações de Taguchi.....	53
4.1.2	Ensaio de cisalhamento – Combinações de Fatorial completo .....	59
4.2	Ciclo de temperatura no processo de soldagem.....	63
4.3	Força axial de soldagem.....	67

4.4 Macrografias das juntas soldadas .....	69
4.5 Medições da largura soldada e parcialmente soldada .....	70
4.6 Microdureza .....	72
4.7 Medição da seção resistente .....	75
<b>5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS .....</b>	<b>77</b>
5.1 Desempenho mecânico das amostras .....	77
5.2 Aporte de Energia .....	84
5.3 Considerações finais.....	85
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>91</b>
<b>7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>93</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>94</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>98</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>99</b>
<b>ANEXO III.....</b>	<b>101</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O controle das emissões de poluentes tornou-se um critério importante na seleção de materiais para a indústria automobilística. A utilização de ligas de alumínio, em substituição das ligas de aço, diminui o peso dos veículos automotores, reduzindo, conseqüentemente, as emissões de poluentes e aumentando o seu desempenho (PATEL, SEJANI, *et al.*, 2016) (MITLIN, RADMILOVIC, *et al.*, 2006). Um dos principais problemas que se tem com a utilização de ligas leves reside na baixa soldabilidade apresentadas por essas ligas, tornando difícil a união por processos de soldagem convencionais, na fabricação de painéis ou elementos estruturais, por exemplo. Neste contexto, os processos de soldagem no estado sólido ganham um papel de destaque, pois permitem a soldagem de, virtualmente, qualquer material que apresente certa plasticidade (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006) (BILICI, 2011).

Dentre os processos de soldagem no estado sólido, cita-se a soldagem por fricção e mistura mecânica (FSW), que destina-se a obtenção de cordões de solda. Desde sua invenção em 1991, o FSW tem sido testado em diversas aplicações industriais. Cita-se como exemplo a indústria aeronáutica, especialmente nas uniões de ligas de alumínio, as quais tem seu desempenho afetado quando soldadas por métodos que utilizam fusão dos materiais (MOHAMED, MANURUNG e BERHAN, 2015) (BUFFA, CAMPANILE, *et al.*, 2009).

Posteriormente ao FSW outras tecnologias derivadas surgiram para a união por ponto, como uma alternativa à soldagem por resistência elétrica (RSW), como é o caso da soldagem ponto por fricção e mistura mecânica (FSSW). O processo FSSW vem substituindo, em muitas aplicações, o RSW, o qual tem como desvantagens alto consumo de energia e problemas relacionados a fusão (MITLIN, RADMILOVIC, *et al.*, 2006). Os processos de rebitagem convencional e por auto aprisionamento, que tradicionalmente são utilizadas no lugar da soldagem RSW, trazem como desvantagem aumento significativo de peso à estrutura (PATEL, SEJANI, *et al.*, 2016), sendo este mais um ponto favorável ao FSSW.

Destaca-se ainda que os processo de soldagem no estado sólido produzem poucos fumos e não emitem radiação ionizante, ao contrário de muitos processos convencionais, configurando-se como tecnologias limpas (PAIDAR, KHODABANDEH,

*et al.*, 2014) (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006). Na perspectiva das atuais leis ambientais e do trabalho, esse processo de soldagem ganha força para ser ampliado no ambiente fabril.

Para aplicação desse processo de soldagem em larga escala industrial, muito estudo ainda se faz necessário para compreender mais sobre os mecanismos de formação das juntas soldadas, suas características metalúrgicas e mecânicas, além da influência dos parâmetros de soldagem no resultado final da junta soldada. É dentro deste contexto que situa-se este trabalho que busca investigar o processo FSSW aplicado à liga AA6060-T5 que é uma liga de baixo custo e, em função disso, tem apelo em aplicações estruturais de baixo custo.

## 1.1 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo geral estudar o desempenho mecânico de juntas sobrepostas soldadas pelo processo FSSW da liga AA6060-T5.

## 1.2 Objetivos específicos

Em termos específicos, busca-se:

- Utilizar DOE para avaliar os efeitos das variáveis de processo nas características finais da junta soldada;
- Analisar a macroestrutura na região de soldagem;
- Caracterizar o perfil de microdureza da junta soldada;
- Estudar os efeitos do aporte de calor nas propriedades mecânicas das juntas soldadas;
- Monitorar força axial e temperatura durante a soldagem;
- Verificar a resistência ao cisalhamento das juntas soldadas;
- Avaliar os mecanismos da fratura, em cisalhamento, por meio de análise de falhas;
- Avaliar a aplicabilidade de um centro de usinagem ROMI® D800 para produção de soldas FSSW.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em 1991, pesquisadores do *The Welding Institute* (TWI), do Reino Unido, apresentaram ao mundo o processo de soldagem no estado sólido, conhecido como *Friction Stir Welding* (FSW) (PAYTON, 2005). O processo FSW foi desenvolvido originalmente para obtenção de juntas de topo, por meio de um cordão de solda no estado sólido, ou seja, durante a soldagem a temperatura não atinge o ponto de fusão do material. Para formação da junta soldada utiliza-se uma ferramenta cilíndrica que, em rotação, translada ao longo de uma linha efetuando a união das chapas. É um processo bastante versátil que pode ser aplicado em qualquer material que apresente plasticidade (MOHAMED, MANURUNG e BERHAN, 2015).

O processo de soldagem *Friction Stir Spot Welding* (FSSW) é uma variante do processo FSW, desenvolvido em 2001 no Japão e destina-se à obtenção de juntas sobrepostas por ponto (SU, GERLICH, *et al.*, 2006). No FSSW, a ferramenta é bastante semelhante à do FSW mas, diferentemente deste, não possui movimento de translação, apenas penetra nas chapas dispostas de forma sobreposta. Tipicamente esse processo de penetração dura poucos segundos, onde tempos diferentes são necessários em função dos materiais e das características da ferramenta (SU, GERLICH, *et al.*, 2006). Segundo (ROSENDO, 2009) o processo FSSW já está substituindo os processos convencionais de soldagem ponto e rebite em algumas aplicações industriais.

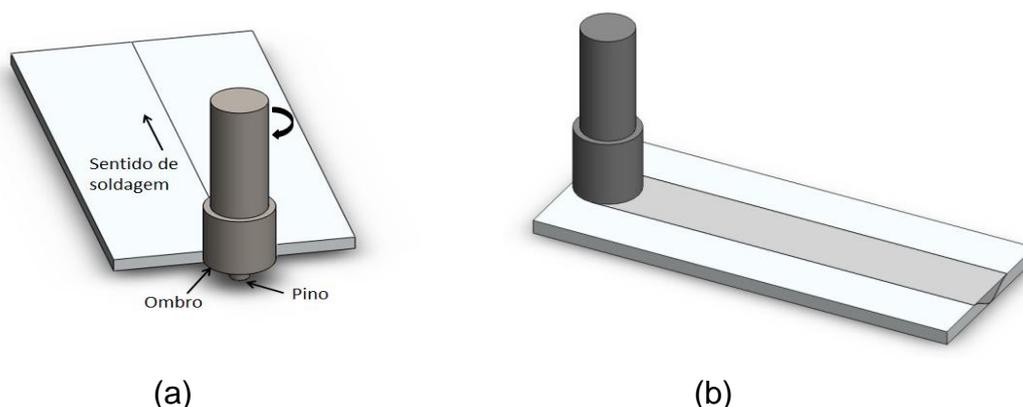
### 2.1 Soldagem por Fricção e Mistura Mecânica

O processo de soldagem FSW é um processo relativamente novo de união no estado sólido. Utiliza uma ferramenta rotativa, não consumível, que avança na interface entre peças (chapas) a serem unidas, como ilustrado na Figura 1(a). O calor decorrente do atrito entre as peças e a ferramenta juntamente com o decorrente da deformação plástica, aumenta a ductilidade do material e faz com que haja um fluxo deste em torno da ferramenta, realizando a soldagem. O resultado do processo é um

cordão de solda, Figura 1 (b), que dá origem a uma junta de topo. (HIRASAWA, BADARINARAYAN, *et al.*, 2010)

A ferramenta de soldagem no processo FSW é constituída por dois elementos fundamentais: pino e ombro. O ombro é o principal responsável pela geração de calor além de restringir o fluxo de material, enquanto o pino é o principal responsável pela mistura mecânica dos materiais das chapas (BUFFA, CAMPANILE, *et al.*, 2009) (MITLIN, RADMILOVIC, *et al.*, 2006).

Figura 1 – Representação esquemática do processo FSW: (a) configuração das chapas e da ferramenta (b) cordão de solda



Fonte: Próprio autor

Segundo (BUFFA, CAMPANILE, *et al.*, 2009) o fluxo de calor é gerado pelo trabalho da força de atrito e pela deformação, porém o calor gerado não é suficiente para levar à fusão dos materiais. Na medida em que a ferramenta translada ao longo da interface entre as chapas, o material é “forçado” a fluir em torno do pino, enquanto o ombro da ferramenta gera uma força de compressão consolidando o cordão. Num plano transversal em relação ao movimento de translação da ferramenta, a solda apresenta um perfil assimétrico, caracterizando um lado de retração e um lado de avanço (BUFFA, CAMPANILE, *et al.*, 2009).

Diversos métodos de união tem sido utilizados em estruturas metálicas e o FSW destaca-se dentre as técnicas tradicionais por ser uma técnica que necessita de

pouca energia, ser inteiramente no estado sólido, ser praticamente não poluente e não por necessitar de metal de adição (VIDAL e INFANTE, 2013).

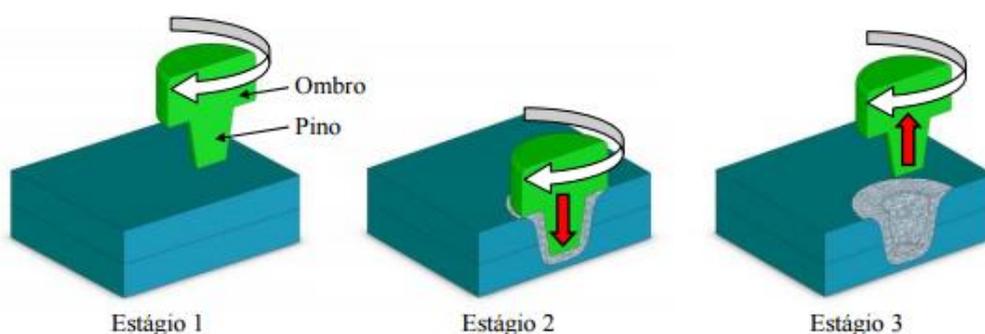
O processo FSW tem sido bem sucedido quando aplicado em ligas de alumínio promovendo melhores propriedades mecânicas. (VENKATESWARLU e DAVIDSON, 2012). Outras ligas como magnésio, cobre, aço, titânio, dentre outros de baixa soldabilidade, também tem sido unidas com sucesso com o FSW, sem trazer os problemas relacionados à fusão (JONCKHEERE e MEESTER, 2012). O processo também possibilita a criação de juntas dissimilares com excelentes características mecânicas. (SILVA, BRAGA e FIGUEIREDO, 2015)

## 2.2 Soldagem Ponto por Fricção e Mistura Mecânica

O processo de soldagem FSSW foi desenvolvido no Japão em 2001, numa parceria entre as empresas Mazda Motor Corporation e Kawasaki Motor Corporation, como uma derivação do FSW. Consiste em uma alternativa ao processo de soldagem por resistência elétrica (RSW) na união de juntas sobrepostas, principalmente em aplicações automotivas (PAYTON, 2005).

A Figura 2 mostra, esquematicamente, o processo de soldagem FSSW que está representado em três estágios: rotação da ferramenta, penetração e retirada.

Figura 2 - Estágios da Soldagem FSSW



Fonte: Rosendo (2009)

No Estágio 1 a ferramenta é posta em rotação numa velocidade pré-determinada e a mesma é posicionada junto a superfície da chapa superior. O Estágio 2 é caracterizado pela penetração da ferramenta nas chapas até o ombro atingir uma determinada profundidade na chapa superior. No Estágio 3 a ferramenta retorna à sua posição inicial, deixando um pequeno furo no centro do botão de solda, com o formato do pino da ferramenta. Entre os estágios 2 e 3 pode-se manter a ferramenta em rotação na mesma posição por um determinado período chamado de tempo de permanência (ou *dwell time*).

O processo FSSW vem substituindo com sucesso o processo RSW e o processo de rebitagem em aplicações industriais, devido sua fácil automatização e alta eficiência de soldagem (BILICI, 2011). Ademais, o processo RSW é suscetível à ocorrência de trincas e porosidades na região soldada, dentre outros problemas decorrentes da fusão e solidificação. (BOZKURT e BILICI, 2013).

Segundo (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006) o calor de fricção resultante da rotação do pino causa uma mistura do material nas direções circunferencial e axial (eixo da ferramenta). A pressão exercida pelo ombro da ferramenta forma um anel na chapa superior e restringe o fluxo de material, que tende a “escapar” da região da solda. Na retirada da ferramenta o pino deixa um furo no centro na solda, que é a característica do processo.

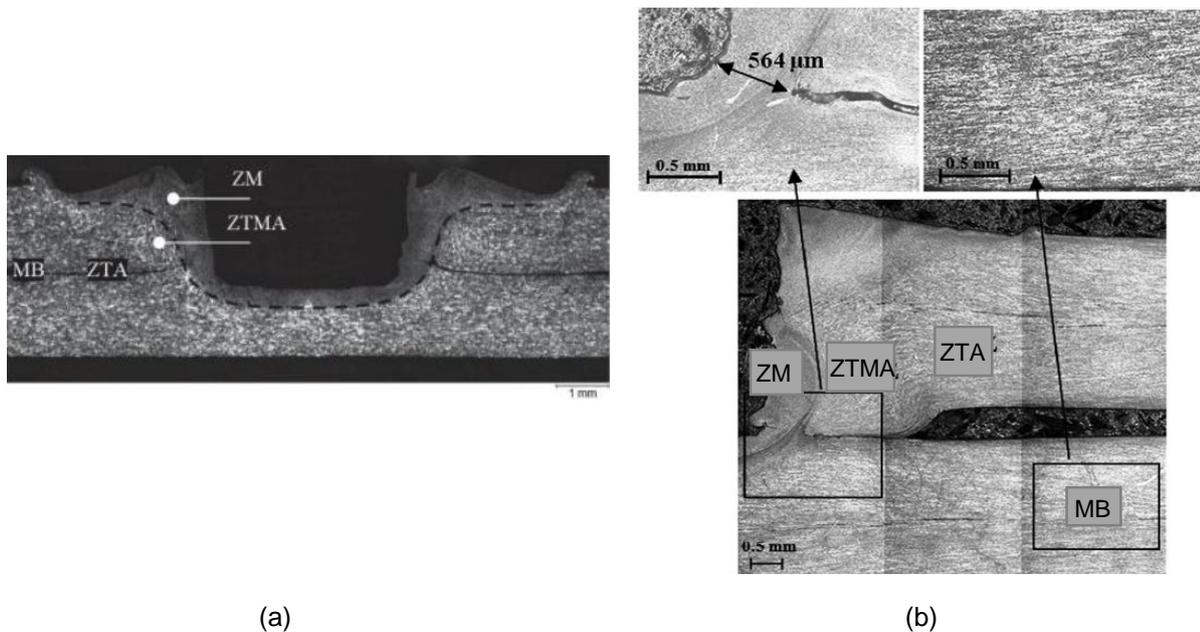
As propriedades mecânicas da junta soldada dependem dos parâmetros utilizados para a soldagem. Como parâmetros de soldagem, tem-se: velocidade de rotação, velocidade de penetração, velocidade de retirada, tempo de permanência e geometria da ferramenta. A combinação destes parâmetros de soldagem define as características finais da junta soldada, a presença de defeitos, qualidade da adesão, dureza, microestrutura, tamanho do botão de solda, dentre outras características (PATHAK, BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2012) (J.Y.CAO, WANG, *et al.*, 2016).

### **2.2.1 Microestrutura no processo FSSW**

Segundo (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014) as juntas soldadas pelo processo FSSW exibem, três diferentes zonas: Zona de Mistura (ZM), Zona Termo-

Mecanicamente Afetada (ZTMA) e Zona Termicamente Afetada (ZTA), além do Metal Base (MB), como mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Macrografia de uma solda FSSW, mostrando as zonas da solda e a interface entre as chapas



Fonte: (a) (CAMPANELLI, DE ALCÂNTARA e DOS SANTOS, 2011) (b) Adaptado de (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014)

A microestrutura na ZM e ZTMA é resultante dos efeitos da deformação plástica e do calor de fricção na região de soldagem. Na ZTA, a microestrutura dos grãos não é afetada mecanicamente, apenas pelo efeito da temperatura. No MB ocorre aumento da temperatura mas em magnitude insuficiente para causar qualquer alteração na microestrutura (PATHAK, BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2012).

Na ZM os grãos são muito finos, decorrente da recristalização dinâmica causada pela intensa deformação plástica e alta temperatura nessa região. Muitas vezes não se distingue a interface entre as chapas na ZM (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014) (PATHAK, BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2012).

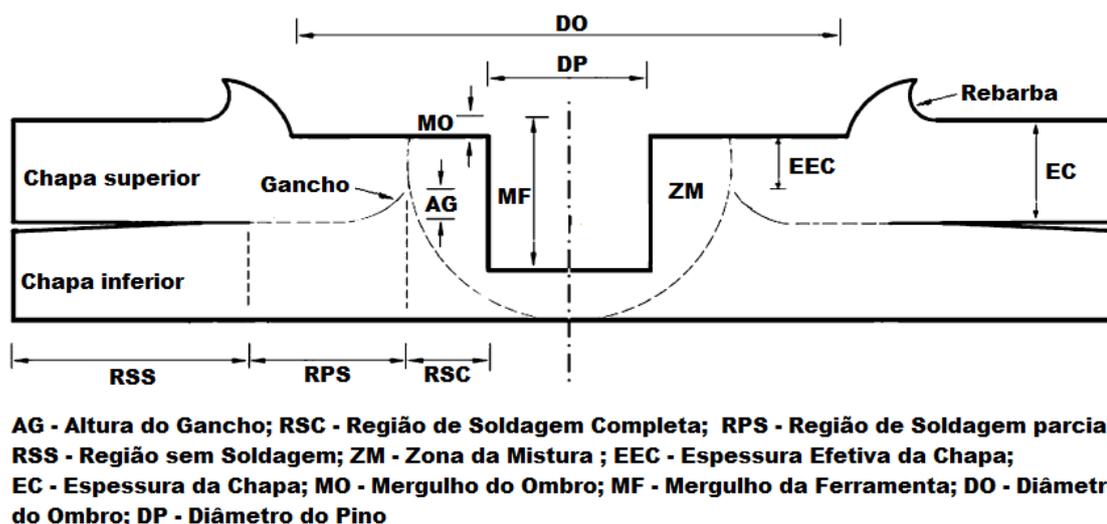
Adjacente à ZM tem-se a ZTMA, que apresenta recristalização parcial, devido a moderada deformação plástica acompanhada de alta temperatura (J.Y.CAO, WANG, *et al.*, 2016). Outra característica marcante da ZTMA são grãos alongados no sentido de fluxo de material, além de serem mais finos que aqueles da ZTA e MB (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014).

Na ZTA, que é afetada apenas pelo calor e não pela deformação plástica, normalmente se vê um crescimento dos grãos causado pela temperatura (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014) (PATHAK, BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2012) (J.Y.CAO, WANG, *et al.*, 2016).

Segundo (BADARINARAYAN, SHI, *et al.*, 2009) o filme de óxidos, presente na superfície das chapas, é quebrado e suas partículas são adicionadas à ZM. Essas partículas são responsáveis por uma ligação completa ou parcial na zona de soldagem. Ainda segundo esses autores, é característico do processo FSSW a formação de um defeito geométrico na interface das duas chapas soldadas, denominado de “hook”, em português conhecido como “gancho” (ROSENDO, *et al.* 2011). A força axial aplicada durante penetração determina a geometria do gancho.

Conforme (BABU, SANKAR, *et al.*, 2012) os dois parâmetros microestruturais mais importantes na região do gancho são: região de soldagem completa (RSC) e altura do gancho (AG). Os parâmetros mencionados juntamente com outras terminologias importantes estão ilustrados na Figura 4.

Figura 4 - Ilustração esquemática da seção transversal de uma junta FSSW



Fonte: Adaptado de (BABU, SANKAR, *et al.*, 2012)

A presença do gancho prejudica a integridade do botão de solda, pois, quando aplicada uma carga externa o início e propagação da trinca tende a ocorrer nessa região (BADARINARAYAN, YANG e OKAMOTO, 2010).

### 2.2.2 Temperatura no processo FSSW

A geração de calor começa quando o pino penetra na chapa superior, porém é o ombro o elemento responsável pelo maior aumento na temperatura. Após a retração da ferramenta a peça retorna à temperatura ambiente suavemente (PATEL, SEJANI, *et al.*, 2016). A temperatura abaixo da ferramenta é suficiente para amolecer o material, porém sem atingir a temperatura de fusão, caracterizando o processo em uma soldagem no estado sólido (PATHAK, BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2012).

Segundo (VENKATESWARLU e DAVIDSON, 2012) na soldagem por fricção e mistura mecânica a velocidade de rotação resulta na mistura do material em volta do pino que, por sua vez, aumenta a temperatura do metal. É observado também o amolecimento do material devido ao aumento da temperatura e pode ocorrer a dissolução de precipitados (BUFFA, CAMPANILE, *et al.*, 2009). Com o acréscimo da velocidade de rotação e profundidade de penetração do ombro da ferramenta aumenta-se o calor aportado e essa é a razão principal para o aumento de tamanho da zona de mistura (PAIDAR, KHODABANDEH, *et al.*, 2014).

Segundo (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006) a condição da interface ferramenta/chapas determina um limite para a elevação da temperatura. Inicialmente existe uma aderência (*stick*) entre metal e ferramenta e na medida em que a ferramenta gira, deforma o material plasticamente elevando a temperatura. Quando a temperatura atinge um certo nível, o material amolecido “perde” a adesão à ferramenta, provocando um patinamento (*slip*). O patinamento leva à diminuição da temperatura que, por sua vez, restabelece a condição de adesão. Esse processo de transição adesão/patinamento (*stick/slip*) se mantém durante o processo e atua como um limitador da temperatura.

Sugere-se que um grande aporte de calor deve ser empregado durante a soldagem fricção e mistura mecânica para realizar a dissolução de partículas de segunda fase antes de atingir a temperatura eutética (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006).

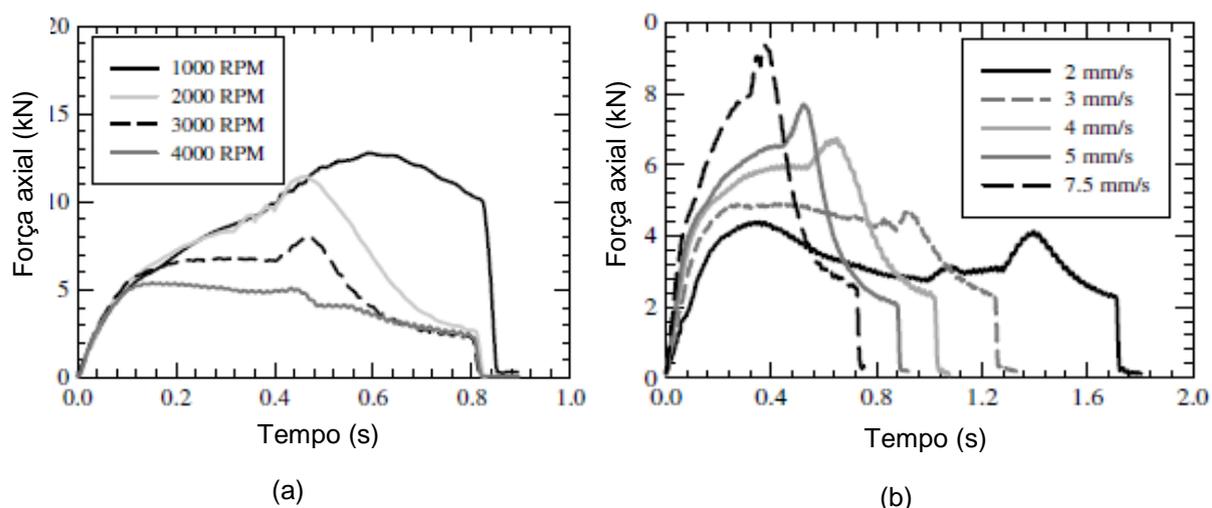
### 2.2.3 Força axial no processo FSSW

A magnitude da força axial varia de acordo com a velocidade rotação. Verifica-se que com velocidades de rotação maiores tem-se menores valores de força axial como mostrado na Figura 5 (a). Também nota-se que a força cresce rapidamente com o contato do ombro na superfície superior da junta (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006). A velocidade de penetração da ferramenta também exerce influência na força axial, como mostra a Figura 5 (b), onde menores valores de força axial são observados para velocidades de penetração menores (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006).

Observa-se que a força axial aumenta rapidamente a partir do contato do pino com a chapa superior, porém a força máxima se dá no momento em que o ombro da ferramenta toca a superfície da chapa superior (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006).

Maiores velocidades de penetração oferecem maior produtividade, porém as maiores forças axiais tendem a diminuir a vida da ferramenta (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006).

Figura 5 - Força axial em função de: (a) rotação e (b) velocidade de penetração



Fonte: Adaptado de (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006)

### 2.3 Liga de alumínio 6060-T5

As ligas de alumínio tem grande apelo para aplicações mecânicas principalmente por sua boa formabilidade, resistência à corrosão, condutividade térmica e elétrica, o que resulta em um grande potencial para aplicação nas indústrias (PATHAK, BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2012).

Além das características citadas anteriormente, um outro fator que contribui para a crescente utilização das ligas de alumínio na indústria é a menor densidade dessas ligas em relação ao aço, o que reduz significativamente o peso dos sistemas mecânicos. Segundo (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006) soldagens em ligas de alumínio necessitam de mais energia em relação ao aço, devido as propriedades elétricas e a alta condutividade térmica do alumínio.

A série 6000 das ligas de alumínio, tem como principais elementos químicos em sua composição o magnésio e o silício. A presença de magnésio e silício, em proporções adequadas, torna essa liga tratável termicamente. Esses elementos também conferem à liga boas propriedades mecânicas, fácil usinabilidade e soldabilidade (HANDBOOK, 1992). Mais de 80% das ligas de alumínio utilizadas no mundo são da série 6xxx (AL-MARAHLEH , 2006).

A composição da liga de alumínio 6060-T5 está mostrada na Tabela 1.

**Tabela 1 - Composição química da liga 6060-T5**

Concentração dos elementos (% em peso)				
Si	Mg	Fe	Mn	Ti
0,47	0,41	0,16	0,06	0,01

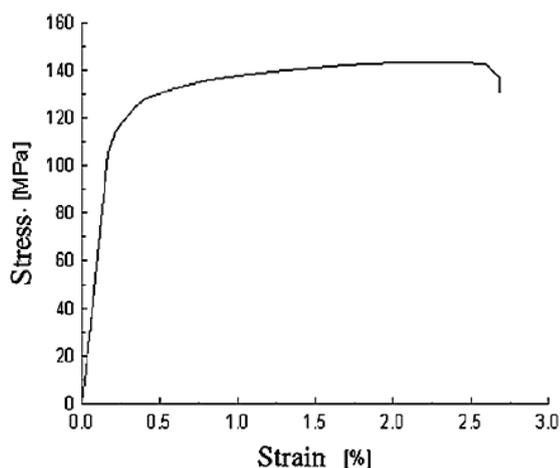
Fonte: (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006)

A condição T5 indica que o material, após sua produção, foi resfriado de uma temperatura elevada em um processo de conformação e envelhecido naturalmente (AALCO, 2017).

A curva tensão x deformação da liga AA6060-T5, mostrada na Figura 6, na condição laminada foi caracterizada por (MERZOUG, MAZARI, *et al.*, 2010). A tensão

máxima de tração foi de 143,8 MPa, o ponto de escoamento foi de 110,63MPa, alongação de 14% e módulo de Young 67,87GPa.

Figura 6 – Curva tensão x deformação liga de alumínio 6060-T5



Fonte: (MERZOUG, MAZARI, *et al.*, 2010)

## 2.4 Método Taguchi

O método Taguchi é uma técnica para otimização de parâmetros de processo. Métodos clássicos de experimentos requerem muitos experimentos, enquanto o método Taguchi possibilita estudar todo o espaço de parâmetros com um número reduzido de experiências (BILICI, 2011).

É característica desse método a utilização de uma matriz ortogonal, que deve ser selecionada de acordo com o número de graus de liberdade (Degree of freedom - DOF). O DOF de cada parâmetro em estudo é o número de níveis de variação menos 1 (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014).

Segundo (BOZKURT e BILICI, 2013) o método Taguchi é uma técnica que pode ser aplicada para aperfeiçoar parâmetros de soldagem, pois é uma técnica simples e robusta. Além disso, a técnica é insensível à variação das condições ambientais e outros fatores de ruído. Na análise de dados de Taguchi, a taxa sinal-ruído (signal to noise ratio - S/N) é utilizada para controlar as respostas, assim como reduzir a

variabilidade sobre esta. Existem três categorias de análise S/N: menor é melhor, maior é melhor e nominal é melhor (SENTHILRAJA, 2015).

Segundo (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014) a maximização da tensão de cisalhamento de juntas sobrepostas soldadas pelo processo FSSW, é dada pela relação maior é melhor. E pode ser calculada através da Equação 1:

$$S/N = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

Onde:

$n$  é o número de testes;

$y_i$  é o parâmetro experimental observado.

Para calcular o efeito dos parâmetros em cada nível, a Equação 2 pode ser utilizada:

$$S/N_{i,j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n S/N_k \quad (2)$$

Onde:

$S/N_{i,j}$  é a média dos valores  $S/N$  dos níveis de cada parâmetro;

$n$  é número de níveis de cada parâmetro;

$S/N_k$  é o valor  $S/N$  da linha  $k$ .

No método Taguchi utiliza-se a tabela de resposta para realizar a classificação dos resultados com maior e menor significância. Um exemplo de tabela de resposta está mostra na Tabela 2 (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014).

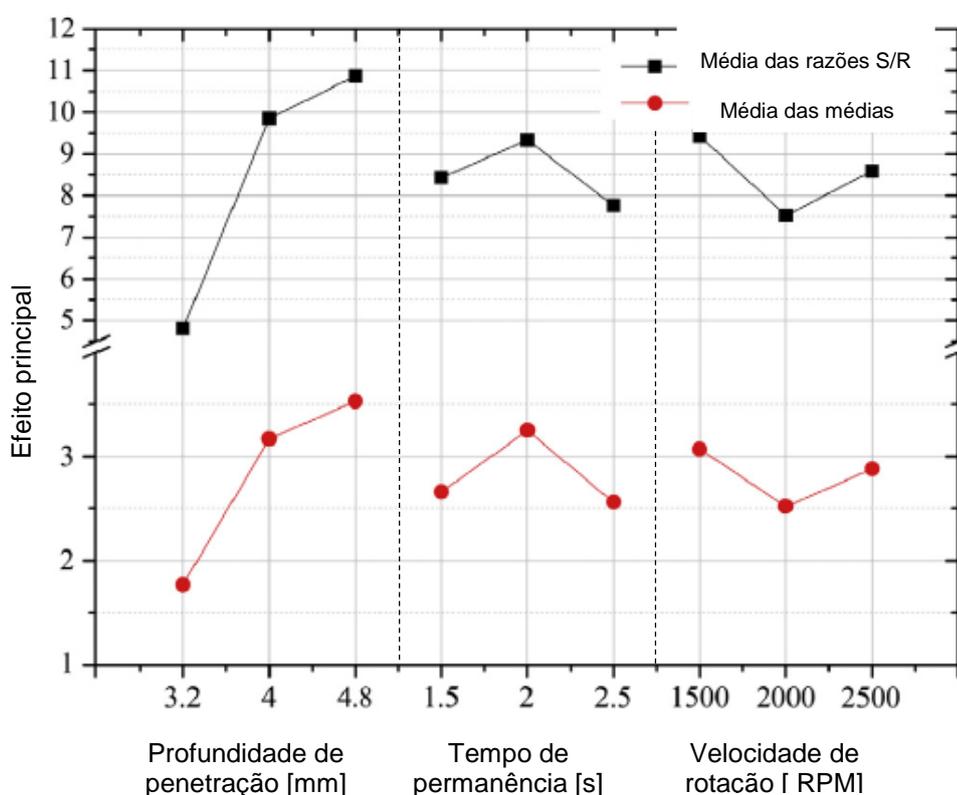
Tabela 2 - Tabela de resposta para nível ótimo em um processo com três variáveis

Fatores	Média da taxa S/R (dB)		
	Velocidade de penetração	Tempo de permanência	Velocidade de rotação
Nível 1	4,80	8,43	9,42
Nível 2	9,85	9,33	7,52
Nível 3	10,86	7,75	8,58
Delta	6,06	1,57	1,90
Classificação	1	3	2

Fonte: Adaptado de (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014)

Para uma melhor visualização e interpretação da Tabela 2 plota-se um gráfico conhecido como gráfico dos efeitos principais sobre a média das médias e a média das razões S/R, mostrado na Figura 7 (BILICI, 2011) (VIDAL e INFANTE, 2013). O valor ótimo pode ser estimado com uma configuração de parâmetro, na qual estará os melhores resultados para cada parâmetro (VENKATESWARLU e DAVIDSON, 2012). Por exemplo, na Figura 7, a combinação ótima seria: Profundidade – 4,8mm; Tempo de permanência – 2s e Velocidade de rotação – 2000 RPM.

Figura 7 - Gráfico dos efeitos principais dos dados da Tabela 2



Fonte: Adaptado de (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014)

Após obter a tabela de resposta deve-se proceder à análise de variância (ANOVA), que é uma importante ferramenta para identificar os parâmetros que são estatisticamente significantes, e determinar suas contribuições, em porcentagem, para os resultados dos testes (BILICI, 2011) (VENKATESWARLU e DAVIDSON, 2012) (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014).

Após obter os parâmetros ótimos para as respostas os autores utilizaram modelagem de superfície de resposta para definir a equação que descrevesse o experimento com base nos parâmetros apresentados, com um coeficiente de

determinação ( $R^2$ ) maior que 90% (MOHAMED, MANURUNG e BERHAN, 2015) (MUHAMMAD, MANURUNG, *et al.*, 2013) (MUHAMMAD, MANURUNG, *et al.*, 2012).

Os testes de confirmação foram realizados e comprovou-se que a equação descreveu o experimento, por isso recomendou-se a utilização de superfície de resposta juntamente com o método Taguchi (MUHAMMAD, MANURUNG, *et al.*, 2013) (MUHAMMAD, MANURUNG, *et al.*, 2012) (MOHAMED, MANURUNG e BERHAN, 2015).

## **2.5 Contexto atual da soldagem no estado sólido**

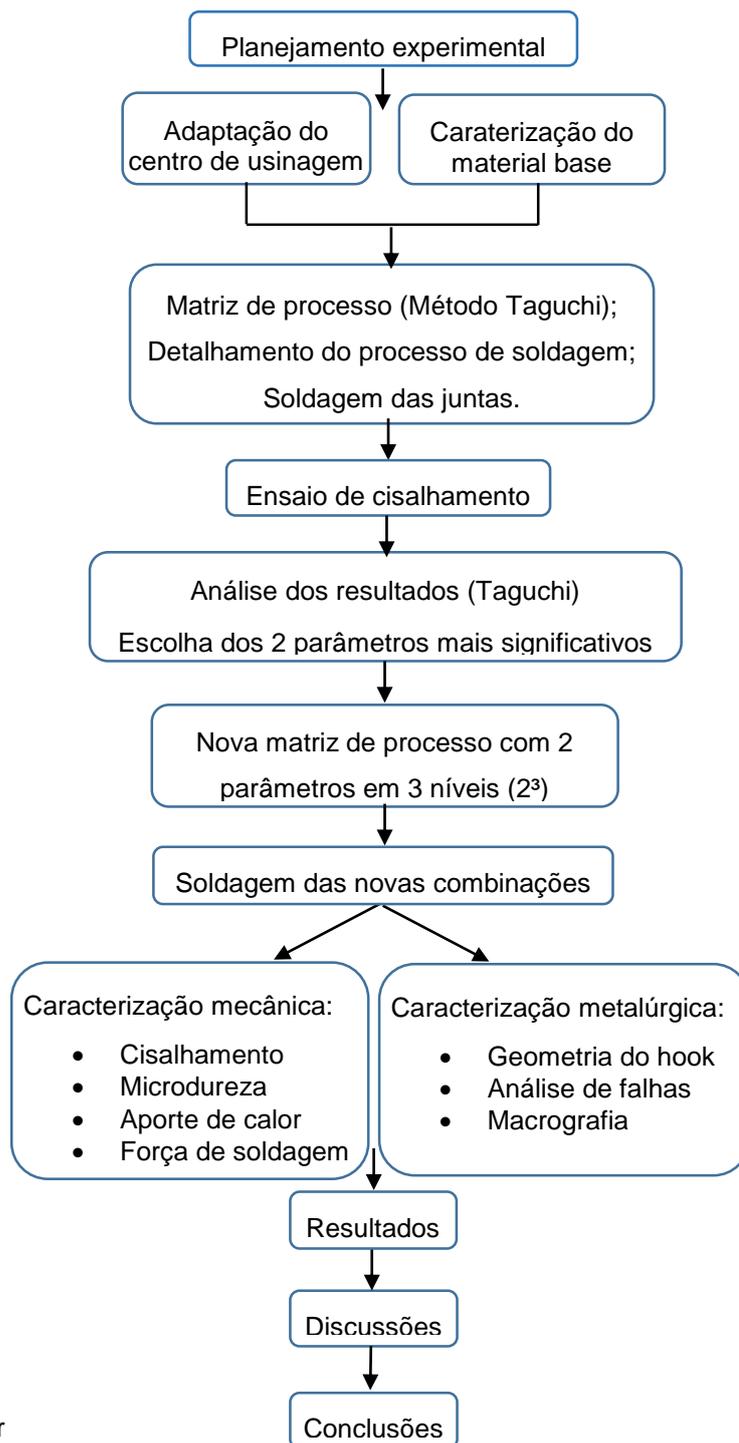
A soldagem no estado sólido vem ganhando espaço nas indústrias nos últimos 20 anos, porém ainda são necessários estudos para aplicação desse processo em produtos de alta complexidade. Defeitos típicos da soldagem no estado sólido são: falta de penetração, partículas de segunda fase e óxidos (VIDAL e INFANTE, 2013). A escolha dos parâmetros corretos é essencial para o desempenho da junta soldada, por isso diversos estudos estão sendo desenvolvidos para otimizar as melhores faixas de parâmetros.

Conhecimento mais aprofundado sobre a condição de adesão entre a ferramenta e as chapas, fenômeno conhecido como *stick/slip*, é necessário para o melhor desenvolvimento das juntas soldadas. Também destaca-se a importância do elemento da junta chamado “gancho” o qual atua diretamente na resistência ao cisalhamento da junta soldada, sendo fundamental um melhor controle sobre ele. A importância da zona parcialmente soldada também tem sido foco de estudo, pois essa região tem papel importante na resistência ao cisalhamento.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

A metodologia experimental, com todas as etapas do trabalho, segue conforme o fluxograma da Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma de atividades

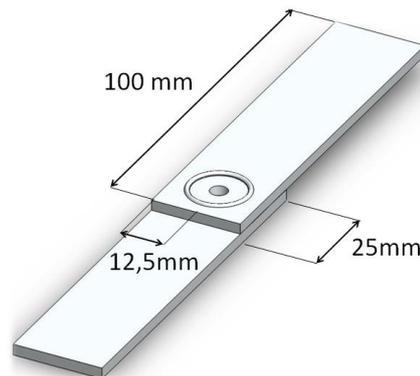


Fonte: Próprio autor

### 3.1 Material das amostras

No trabalho foram utilizadas barras chatas de alumínio AA6060-T5 de 25 mm de largura, 100 mm de comprimento e 3,2 mm de espessura para a produção de corpos de prova (CP) na forma de juntas sobrepostas. Os CP's para ensaio de cisalhamento foram baseados na norma ISO14273:2002 “*Specimens Dimensions and Procedure for Shear Testing Resistance Spot, Seam and Embossed Projection Welds*” como mostrado na Figura 9. A sobreposição foi de 25 mm e o furo central resultante da soldagem ficou no centro da sobreposição.

Figura 9 – Representação esquemática dos corpos de prova mostrando as dimensões da junta soldada



Fonte: Próprio autor

A liga estudada (AA6060-T5) foi submetida a uma análise química por meio de um espectrômetro do Laboratório de Metalurgia Física (LAMEF) da UFRGS. A composição química da liga está mostrada na Tabela 3.

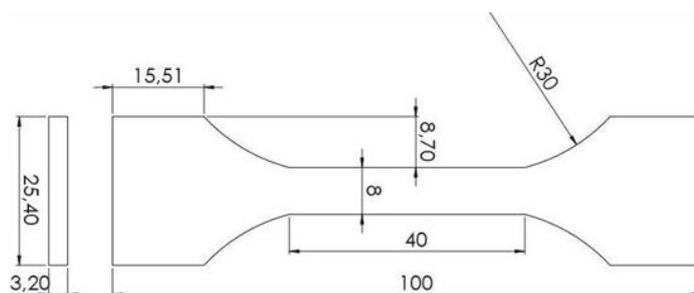
Tabela 3 - Composição química da liga AA6060-T5 (metal base)

Concentração dos elementos (% em peso)									
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros	Al
0,45	0,19	0,06	0,08	0,53	0,003	0,01	0,03	0,02	98,62

Fonte: Próprio autor

O metal base também foi submetido a um ensaio de tração, em uma EMIC DL20000, para caracterização mecânica. Foram produzidos 3 CP's para o ensaio de tração, cujas dimensões estão mostradas na Figura 10, e estão de acordo com a norma NBR6892:2002

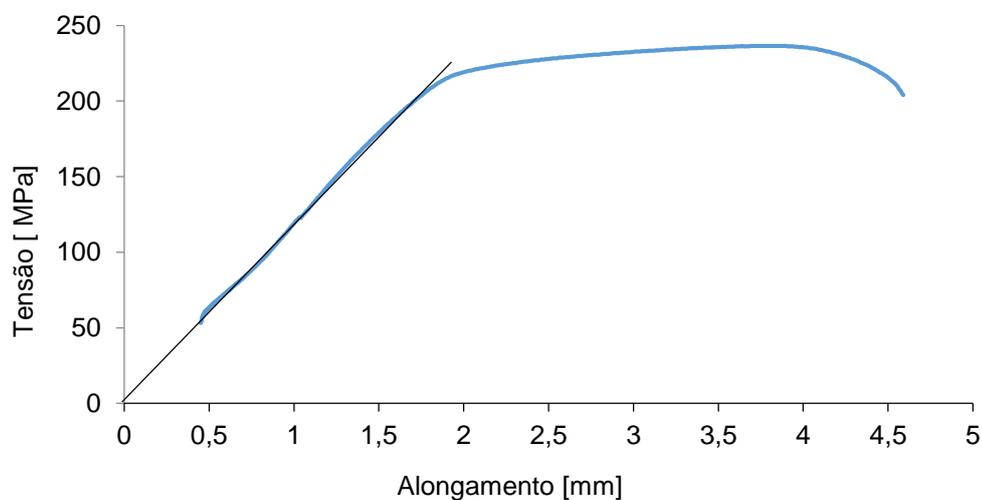
Figura 10 - Desenho e dimensões dos corpos de provas produzidos para ensaio de tração de caracterização do metal base



Fonte: Próprio autor

A Figura 11 mostra a curva tensão x alongamento do AA6060 – T5 obtido nos ensaios de tração. A resistência mecânica foi, em média, 233,34 MPa.

Figura 11 - Curva tensão x alongamento medida experimentalmente para o metal base

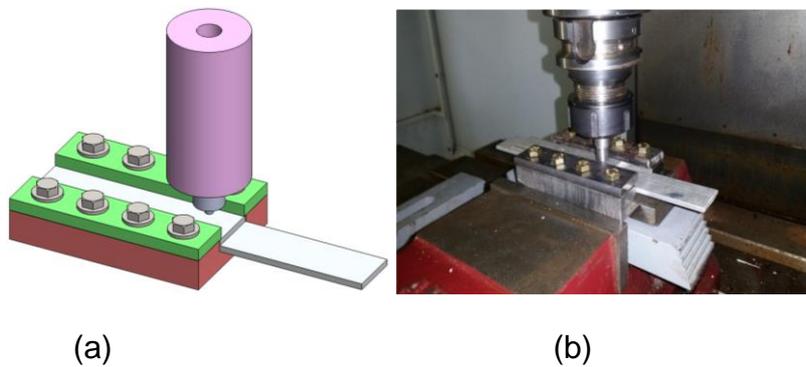


Fonte: Próprio autor

### 3.2 Equipamento de soldagem

No início do trabalho foi desenvolvido um gabarito de soldagem para posicionar as chapas e fixá-las na mesa do centro de usinagem CNC, como mostrado na Figura 12 (a) e (b).

Figura 12 - (a) Desenho do gabarito de soldagem (b) Montagem do sistema no centro de usinagem CNC



Fonte: Próprio autor

As soldas foram realizadas com um centro de usinagem Romi® D800, mostrado na Figura 13.

Figura 13 - Centro de usinagem Romi D800 utilizado para a soldagem

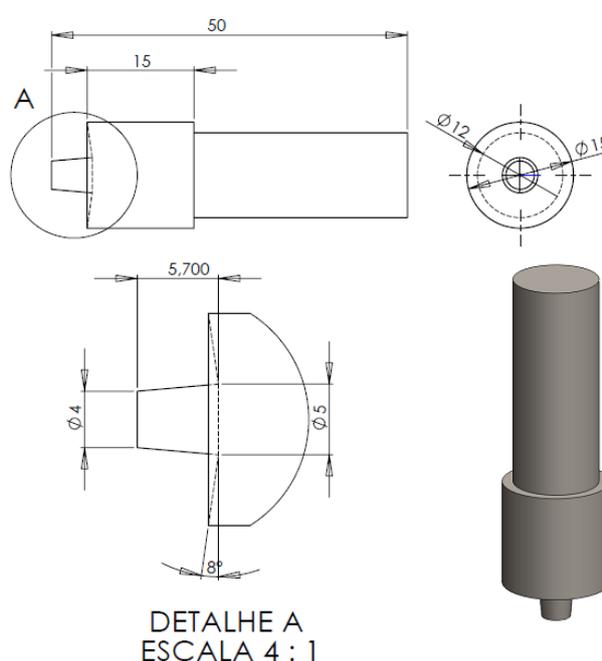


Fonte: Próprio autor

### 3.3 Ferramenta de soldagem

A ferramenta utilizada foi fabricada em aço M2 e temperada em óleo (temperatura de austenitização de 1200 °C) e posteriormente submetida a dois revenimentos (2,5h em temperatura de 550 °C) resultando em uma dureza aproximada de 65 HRC, suas características estão mostradas na Figura 14.

Figura 14 – Ferramenta de soldagem:



Fonte: Próprio autor

Antes da soldagem as chapas foram colocadas em um Becker imersas em acetona para limpeza em banho-maria em um aparelho de ultrassom à temperatura ambiente por 20 minutos. Esse procedimento de limpeza foi realizado para eliminar possíveis resquícios de impurezas que pudessem interferir na qualidade final da soldagem.

A ferramenta antes de cada processo de soldagem foi encostada na chapa superior. A profundidade de penetração do pino e do ombro foram fixados em 5,7 e 0,3mm, respectivamente, totalizando 6 mm. Portanto, a penetração total foi de

aproximadamente 94% da espessura combinadas das chapas que é 6,4 mm. O tempo total de soldagem foi obtido após cada soldagem na própria interface da máquina.

### 3.4 Parâmetros de soldagem

Dentre as diversas variáveis do processo, foi escolhido para serem avaliadas, os seguintes parâmetros: Velocidade de rotação da ferramenta (VR), Velocidade de penetração da ferramenta (VP) e tempo de permanência (TP). Os níveis definidos para cada parâmetro de soldagem estão mostrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Tabela de parâmetros

Parâmetros	Símbolos	Níveis		
		1	2	3
<b>Velocidade de rotação [RPM]</b>	VR	1500	2000	2500
<b>Velocidade de penetração [mm/min]</b>	VP	120	160	200
<b>Tempo de permanência [s]</b>	TP	0	2	4

Fonte: Próprio autor

Para facilitar o andamento do trabalho, convencionou-se a seguinte ordem na nomenclatura das combinações de soldagem: Velocidade de Rotação, Velocidade de penetração e Tempo de permanência. Por exemplo, a combinação 1500/200/4 significa 1500RPM de velocidade de rotação, 200mm/min de velocidade de penetração e 4s de tempo de permanência.

#### 3.4.1 Planejamento experimental – Método Taguchi

Os parâmetros escolhidos, foram submetidos à metodologia de experimentos de Taguchi, com a qual foram definidas as combinações de parâmetros para cada experimento. A Tabela 5 mostra as nove combinações resultantes da aplicação do método Taguchi ( $L_9$ ), onde 4 soldagens foram realizadas por combinação.

Tabela 5 - Combinações de parâmetros aplicando o método de Taguchi

<b>Experimento</b>	<b>Nomenclatura</b>	<b>Rotação (RPM)</b>	<b>Avanço (mm/min)</b>	<b>Tempo de permanência(s)</b>
<b>1</b>	1500/120/0	1500	120	0
<b>2</b>	1500/160/2	1500	160	2
<b>3</b>	1500/200/4	1500	200	4
<b>4</b>	2000/120/2	2000	120	2
<b>5</b>	2000/160/4	2000	160	4
<b>6</b>	2000/200/0	2000	200	0
<b>7</b>	2500/120/4	2500	120	4
<b>8</b>	2500/160/0	2500	160	0
<b>9</b>	2500/200/2	2500	200	2

Fonte: Próprio autor

### 3.4.2 Planejamento experimental – Fatorial completo

Após a soldagem dos CP's conforme as combinações de Taguchi, foi realizado o ensaio de cisalhamento nas amostras. Com base nos resultados do ensaio e nas análises de Taguchi foi escolhido os 2 parâmetros mais significantes para o processo para a realização de um fatorial completo  $2^3$  (2 parâmetros em 3 níveis). Foi gerado uma nova tabela de combinações, Tabela 6, e realizou-se novas soldagens.

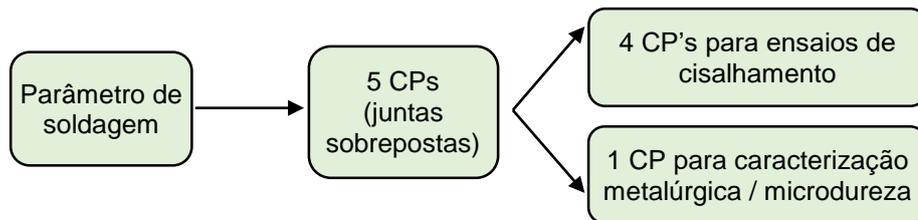
Tabela 6 - Combinações de fatorial completo  $2^3$ 

<b>Experimento</b>	<b>Parâmetro 1</b>	<b>Parâmetro 2</b>
<b>10</b>	1	1
<b>11</b>	1	2
<b>12</b>	1	3
<b>13</b>	2	1
<b>14</b>	2	2
<b>15</b>	2	3
<b>16</b>	3	1
<b>17</b>	3	2
<b>18</b>	3	3

Fonte: Próprio autor

Com cada combinação de parâmetros, da nova combinação, foram produzidos 5 corpos de prova. Como mostra a Figura 15, onde 4 CP foram destinadas ao ensaio de cisalhamento e 1 CP para caracterização metalúrgica.

Figura 15 - Aplicação dos CP's



Fonte: Próprio autor

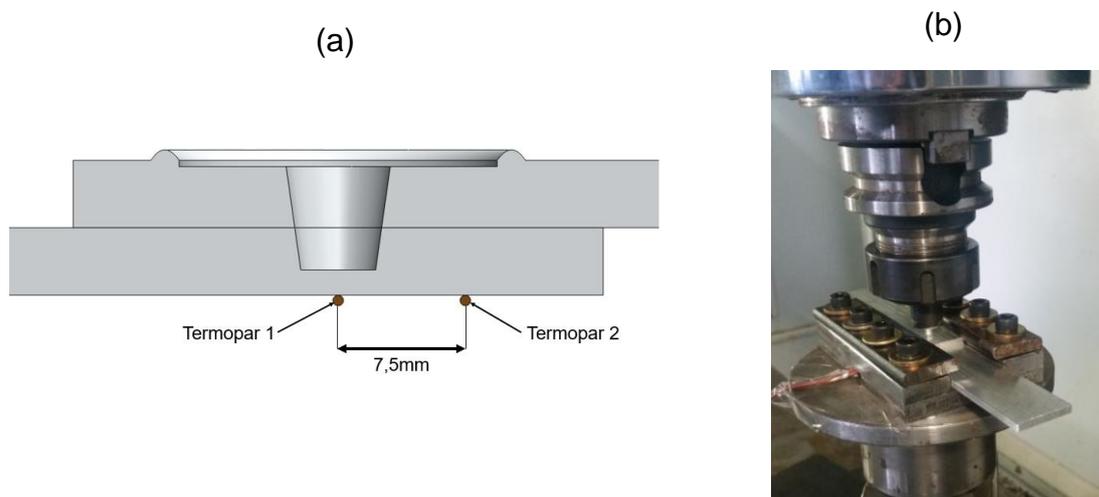
### 3.5 Monitoramento do processo

Durante as soldagens das amostras foram monitorados os ciclos de temperatura e de força axial, com o objetivo de avaliar o nível de energia associado a obtenção das juntas soldadas com cada parâmetro.

#### 3.5.1 Medição de temperatura

O aporte de calor durante a soldagem foi avaliado por meio da medição de temperatura em dois diferentes pontos da junta soldada, com o uso de termopares tipo J. Para aquisição de dados foi utilizado um condicionador de sinais modelo *Spider 8* da HBM conectado a um microcomputador, o software *CatMan* fez a avaliação em tempo real dos dados com uma taxa de 50kHz. Uma representação esquemática da localização dos termopares na junta sobreposta está mostrada na Figura 16 (a) e em (b) se tem o sistema de medição em funcionamento.

Figura 16 - Disposição dos termopares para medição de temperatura



Fonte: Próprio autor

### 3.5.2 Medição de força axial de soldagem

Para a medição da força axial de soldagem utilizou-se uma célula de carga de 100 kN e um dispositivo para conectar o suporte à célula de carga como mostrado na Figura 17. Para aquisição dos dados utilizou-se um condicionador de sinais modelo *Spider 8* da HBM

Figura 17 - Sistema de medição da força axial de soldagem



Fonte: Próprio autor

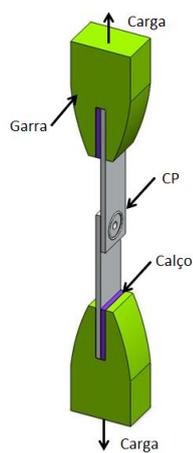
### 3.6 Caracterização mecânica

Posteriormente as soldagens, as amostras foram submetidas a caracterizações mecânicas e metalúrgicas com a finalidade de caracterizar o desempenho mecânico das juntas as características gerais da união.

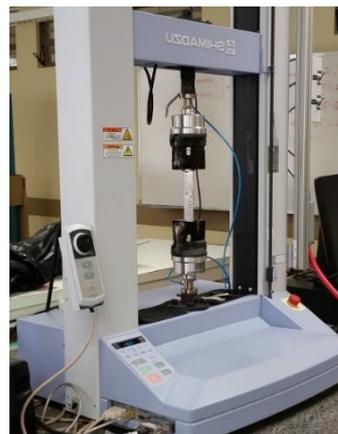
#### 3.6.1 Ensaio de cisalhamento

O ensaio mecânico de cisalhamento foi realizado em uma máquina universal de ensaios Shimadzu AGS-X 5kN, Figura 18 (b), utilizando uma célula de carga de 5kN. A velocidade do ensaio foi de 0,5 mm/min. A Figura 18 (a) mostra uma representação esquemática do ensaio, foi utilizado 2 calços nos corpos de provas para garantir apenas esforço em uma direção.

Figura 18 – Ensaio de cisalhamento: (a) representação esquemática e (b) foto de um ensaio em andamento.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor

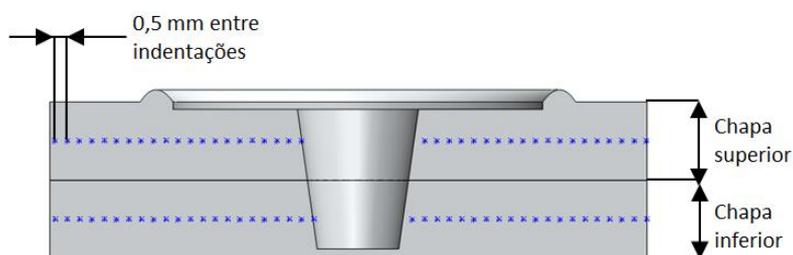
### 3.6.2 Microdureza

Para melhor mapear as diferentes zonas da solda avaliou-se o perfil de microdureza nas amostras. Realizou-se ensaio de microdureza Vickers com carga de 200g em um microdurômetro modelo Buehler Micromet 6010, mostrado na FIGURA 19(a). As indentações foram realizadas com espaçamento de 0,5 mm entre medições e tempo de aplicação de carga de 10s. Os perfis de microdureza foram medidos à meia espessura das chapas superior e inferior, como mostrado na Figura 19 (b).

Figura 19 – Medição dos perfis de microdureza: (a) microdurômetro Buehler Micromet 6010 e (b) esquema da seção transversal da solda mostrando a distribuição dos pontos de medição.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor

## 3. 7 Caracterização metalúrgica

### 3.7.1 Macrografia

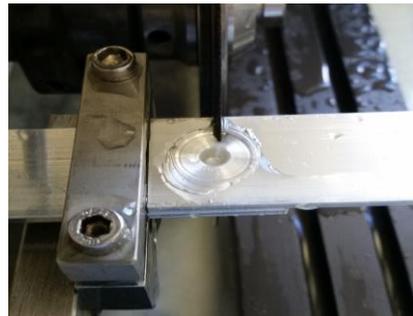
O seccionamento das amostras foi realizado com auxílio de um disco abrasivo para corte de precisão em uma máquina Buehler Isomet 4000, mostrado na Figura 20 (a). As amostras destinadas à análise metalográfica foram seccionadas à 0,5 mm deslocado do centro do botão de solda como mostrado na Figura 20 (b). A preparação

da amostra seguiu a técnica metalográfica padrão de embutimento, lixamento e polimento. Após o polimento as amostras foram atacadas com reagente de seguinte composição: 100mL de HCl, 100mL de HNO<sub>3</sub>, 25mL de HF e 100mL de H<sub>2</sub>O para revelação de aspectos geométricos da junta soldada e observação da macroestrutura.

Figura 20 - (a) Cortadora metalográfica de precisão Buehler modelo Isomet 4000 e em (b) Corte sendo realizado



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor

Uma lupa Olympus do laboratório LAMEF – UFRGS foi utilizada para avaliação da junta soldada e verificação da zona de mistura Figura 21.

Figura 21 – Lupa Olympus SZ-CTV com interface computadorizada para captura de imagens.



Fonte: Próprio autor

### 3.7.2 Análise de falhas

Para avaliação dos mecanismos de fratura nos ensaios de cisalhamento, foi feita análise das superfícies de fratura utilizando microscopia eletrônica de varredura. Um microscópio eletrônico de varredura (MEV) marca Zeiss, modelo EVO MA10, mostrado na Figura 22, foi utilizado.

Figura 22 - Microscópio eletrônico de varredura Zeiss EVO MA10



Fonte: Próprio autor

### 3.7.3 Medição da área cisalhada

A área cisalhada das amostras, posteriormente aos ensaios de cisalhamento, foi medida utilizando o MEV, como a finalidade de inferir a área soldada das amostras mais discrepantes em termos de resistência mecânica.

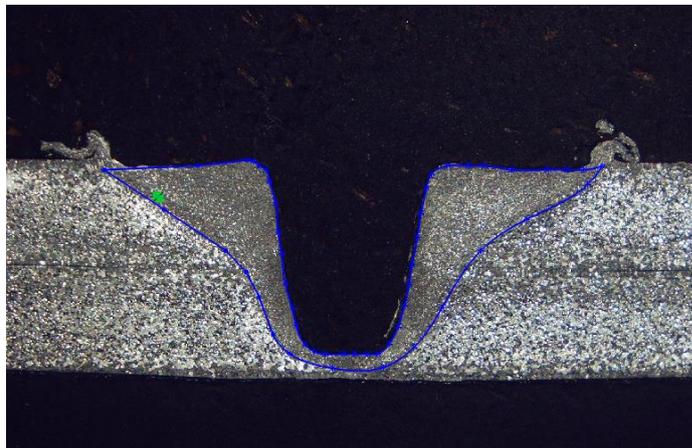
### 3.7.4 Medição da área soldada e parcialmente soldada

Nessa etapa utilizou-se o MEV para medir a área parcialmente soldada e a área soldada. As análises foram realizadas nas amostras na condição polida. Foram avaliadas as amostras mais discrepantes entre si no resultado do ensaio de cisalhamento.

### 3.7.5 Medição da zona de mistura e largura soldada + parcialmente soldada

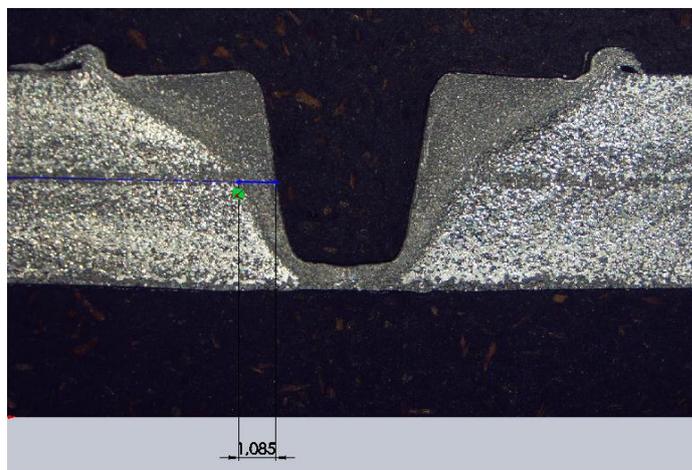
Para a medição da ZM e das larguras soldada e parcialmente soldada utilizou-se o software Solid Works, com auxílio da ferramenta de imagem de esboço, foram importadas as imagens das macrografias. Após o redimensionamento da imagem, foi utilizada a ferramenta de esboço *spline* para percorrer a área de mistura, como ilustrado na Figura 23. Também foi medida a largura da ZM, na posição da interface das chapas, conforme mostra a Figura 24.

Figura 23 - Medição da área da ZM utilizando o software Solid Works



Fonte: Próprio autor

Figura 24 - Medição da largura da ZM com auxílio do software Solid Works



Fonte: Próprio autor

### **3.8 Análise dos resultados**

Na finalização desse trabalho foram confrontados os melhores resultados de desempenho mecânico e características metalúrgicas das juntas soldadas pelo processo FSSW da liga AA6060-T5. Os resultados obtidos nas diversas análises foram examinados e confrontados com a finalidade de buscar correlações entre os parâmetros de processo e as características gerais da junta soldada.

## 4 RESULTADOS

A Figura 25 mostra o botão de solda resultante do processo de soldagem FSSW. No centro do botão observa-se o furo deixado pela ferramenta, que é característico do processo. Observa-se também a rebarba formada através da “fuga” de material para fora do botão de solda durante a soldagem.

Figura 25 - Junta sobreposta obtida pelo processo FSSW.



Fonte: Próprio autor

A caracterização das juntas foi realizada através de: análises metalográficas das seções transversais dos botões de solda, ensaio de cisalhamento, microdureza, análise dos mecanismos de falha, perfil de temperatura e força axial de soldagem e determinação da área soldada.

### 4.1 Ensaio de cisalhamento

É importante lembrar que o estudo foi realizado em duas etapas: inicialmente foi aplicado o método Taguchi resultando em uma matriz ortogonal  $L_9$  (três parâmetros de soldagem em três níveis) e, posteriormente, foi feito um fatorial completo  $2^3$  (dois parâmetros em três níveis). O estudo fatorial completo foi feito com os dois parâmetros de processo mais significativos indicados pelo método Taguchi.

O ensaio de cisalhamento fornece resultado mais importante para esse trabalho, uma vez que o foco principal está na caracterização do comportamento mecânico das juntas soldadas. Com base nos resultados deste ensaio escolhem-se os parâmetros de processo mais significantes pela análise ANOVA que será mostrada no próximo tópico.

#### 4.1.1 Ensaio de cisalhamento – Combinações de Taguchi

Foram ensaiados três corpos de prova (CP) para cada uma das condições de soldagem mostrada na Tabela 5. A Tabela 7 mostra os resultados obtidos no ensaio de cisalhamento, expresso em termos da carga máxima, assim como a média e o desvio padrão para cada combinação de parâmetros.

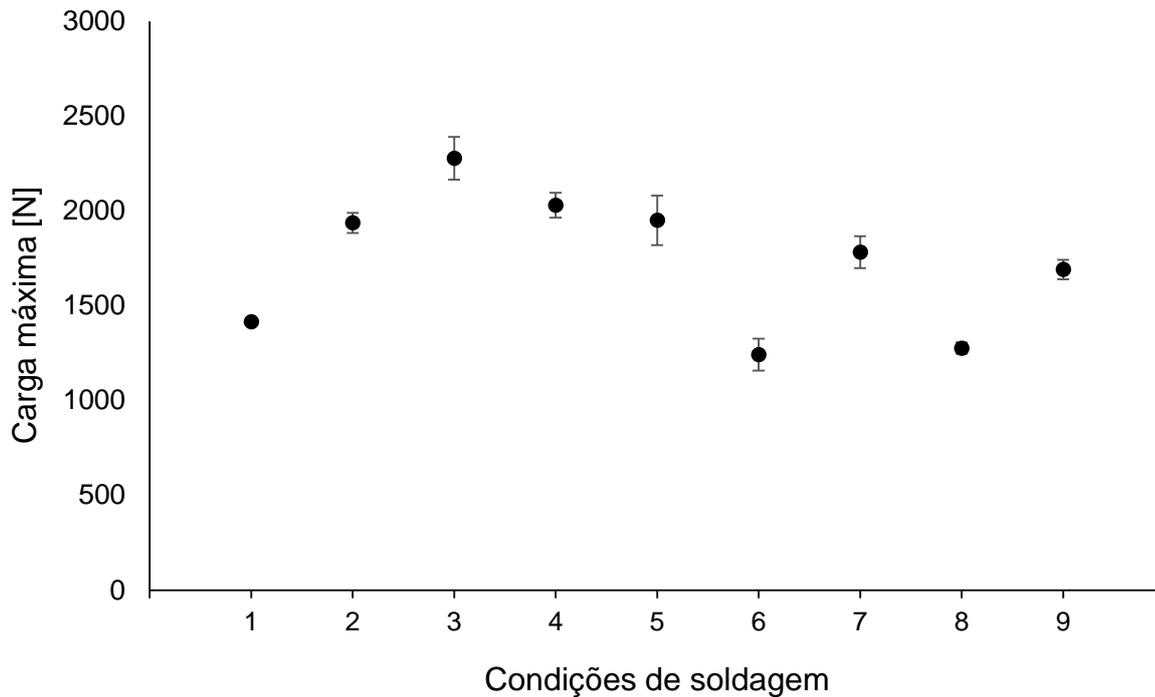
Tabela 7 - Resultados de ensaio de cisalhamento – combinações de Taguchi

Amostras	Parâmetros			Resposta			Carga média [N]	Desvio padrão [N]
	VR (RPM)	VP (mm/min)	TP (s)	Carga 1 [N]	Carga 2 [N]	Carga 3 [N]		
1	1500	120	0	1412,8	1400,8	1430,9	1414,8	12,4
2	1500	160	2	1878,1	1924,0	2006,7	1936,3	53,2
3	1500	200	4	2141,1	2273,4	2416,6	2277,0	112,5
4	2000	120	2	1991,6	2121,1	1975,7	2029,4	65,1
5	2000	160	4	1814,3	1909,2	2126,4	1949,9	130,6
6	2000	200	0	1228,2	1351,9	1145,8	1242,0	84,7
7	2500	120	4	1866,3	1811,3	1666,8	1781,5	84,1
8	2500	160	0	1317,1	1258,2	1252,7	1276,0	29,2
9	2500	200	2	1618,9	1733,8	1719,7	1690,8	51,2

Fonte: Próprio autor

Na Figura 26 nota-se que algumas condições de soldagem conciliam alta resistência mecânica com boa reprodutibilidade enquanto para outras se vê uma certa dispersão.

Figura 26 – Resistência ao cisalhamento em termos da carga máxima medida nos ensaios de cisalhamento – Testes de Taguchi.



Fonte: Próprio autor

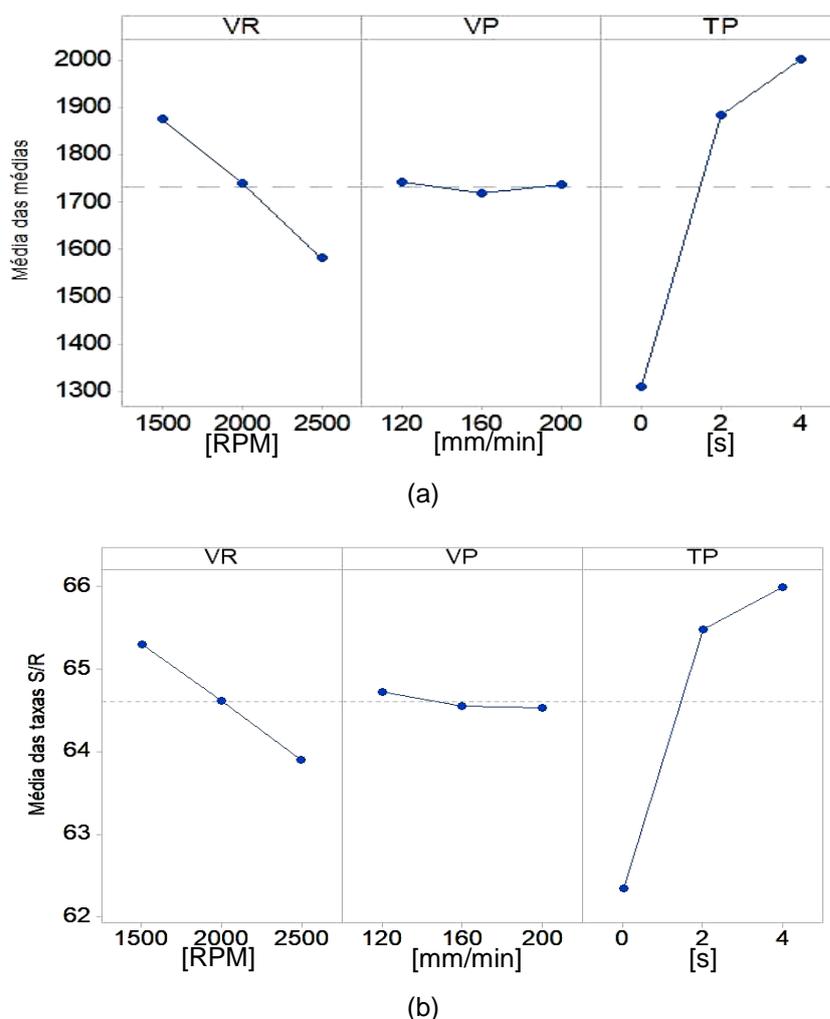
O método Taguchi mostra seus resultados de duas maneiras: média das médias Figura 27(a) e médias das razões S/R Figura 27(b). A média indica o valor médio das respostas experimentais para cada parâmetro em diferentes níveis, onde a média para cada nível corresponde a média aritmética das respostas para este nível. A razão S/R é a quantificação do desvio da variável resposta em relação aos valores desejados em função das variáveis externas (ruído). Para maximização de um resultado de ensaio de cisalhamento é indicado escolher a razão S/R “maior é melhor”, ou seja, quanto maior for à resistência ao cisalhamento da junta soldada melhor será.

Pode-se observar que a velocidade de rotação e o tempo de permanência são os parâmetros mais importantes na resistência da junta. O tempo de permanência é o parâmetro mais efetivo, enquanto a velocidade penetração não mostra muita significância. A inclinação da curva média das médias, Figura 27(a), indica o nível de importância do parâmetro em análise (velocidade de rotação, velocidade de penetração e tempo de permanência). Quanto maior a inclinação da curva, mais significativo é o parâmetro na propriedade alvo (resistência ao cisalhamento). No caso

da Figura 27 (b), a maior inclinação das curvas indica menor dispersão de resultados uma vez que o sinal (propriedade alvo) é expressivo em relação ao ruído (dispersão).

Para uma otimização de resultados, fica evidente nos gráficos da Figura 27 que a melhor combinação de parâmetros a ser realizada, para maximizar a resistência ao cisalhamento, é a seguinte: VR de 1500, VP de 120 e TP de 4s. É importante salientar que a matriz ortogonal ( $L_9$ ) não avalia todas as combinações possíveis e o efeito das interações entre as variáveis não são avaliadas via Método Taguchi.

Figura 27 – Análise sinal/ruído do método Taguchi - gráficos dos efeitos principais para: (a) média das médias e (b) média da taxa S/R.



Fonte: Próprio autor

A Tabela 8 apresenta os valores das médias e razões S/R dos experimentos nos quais o nível da variável analisada teve participação e também apresenta os valores de Delta e Classificação. A Classificação avalia o parâmetro mais significativo,

sendo 1 para o parâmetro mais significativo e 3 para o menos significativo. A classificação só é possível através do parâmetro Delta que quantifica a diferença entre os valores máximos e mínimo das médias e razão S/R. Observou-se que o parâmetro TP tem a maior amplitude em termos de médias e razão S/R, portanto esse parâmetro é o mais significativo no experimento.

Tabela 8 - Resultados da análise do Método Taguchi – Média e Razão S/R

Nível	VR [RPM]		VP[mm/min]		TP [s]	
	Médias (N)	Razão S/R	Médias (N)	Razão S/R	Médias (N)	Razão S/R
1	1876	65,3	1742	64,73	1311	62,34
2	1740	64,61	1721	64,55	1886	65,48
3	1583	63,9	1737	64,53	2003	65,99
<b>Delta</b>	293	1,4	21	0,2	692	3,65
<b>Classificação</b>	2		3		1	

Fonte: Próprio autor

Para verificar o percentual de contribuição de cada parâmetro de soldagem na resistência ao cisalhamento utilizou-se análise de variância (ANOVA), mostrada na Tabela 9. A variável tempo de permanência (TP) tem uma contribuição de 69,88%, sendo o parâmetro mais significativo do processo. Observa-se que a velocidade de penetração da ferramenta não tem significância para o processo.

Tabela 9 - Tabela ANOVA para o efeito dos parâmetros de soldagem na resistência ao cisalhamento – testes de Taguchi

	Graus de Liberdade	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
<b>VR</b>	1	129014	12,56%	129014	129014	3,57	0,117
<b>VP</b>	1	42	0,00%	42	42	0	0,974
<b>TP</b>	1	718038	69,88%	718038	718038	19,9	0,007
<b>Resíduo</b>	5	180447	17,56%	180447	36089		
<b>Total</b>	8	1027541	100,00%				

Fonte: Próprio autor

Foram buscados modelos empíricos capazes de prever, matematicamente, a resistência das soldas, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de, ao menos, 90%.

### Modelo Linear

Em um primeiro momento, buscou-se um modelo linear, Equação 3, para descrever o processo de soldagem, porém como pode ser visto na Tabela 10 o modelo apresentou um  $R^2$  não satisfatório.

$$R_{\text{máx}} = 1982 - 0,293 VR - 0,07 VP + 173,0 TP \quad [N] \quad (3)$$

Tabela 10 - Resumo do modelo linear

S	$R^2$	$R^2$ (ajustado)
189,97	82,44%	71,90%

Fonte: Próprio autor

### Modelo Quadrático

Após o baixo rendimento do modelo de regressão linear partiu-se para o modelo de regressão de segunda ordem (quadrático), pois muitos fenômenos físicos, químicos e mecânicos são descritos com modelos quadráticos. Como se pode ver na Tabela 11, com o modelo quadrático consegue-se um bom valor de  $R^2$ . O modelo quadrático da Equação 4 é um modelo ajustado, onde foram retirados os termos com baixa contribuição deixando-o mais limpo e de fácil aplicação.

$$R_{\text{max}} = 1477 - 0,083 VR + 692 TP - 57,2 (TP)^2 - 0,1212 VR.TP - 0,400 VP.TP \quad [N] \quad (4)$$

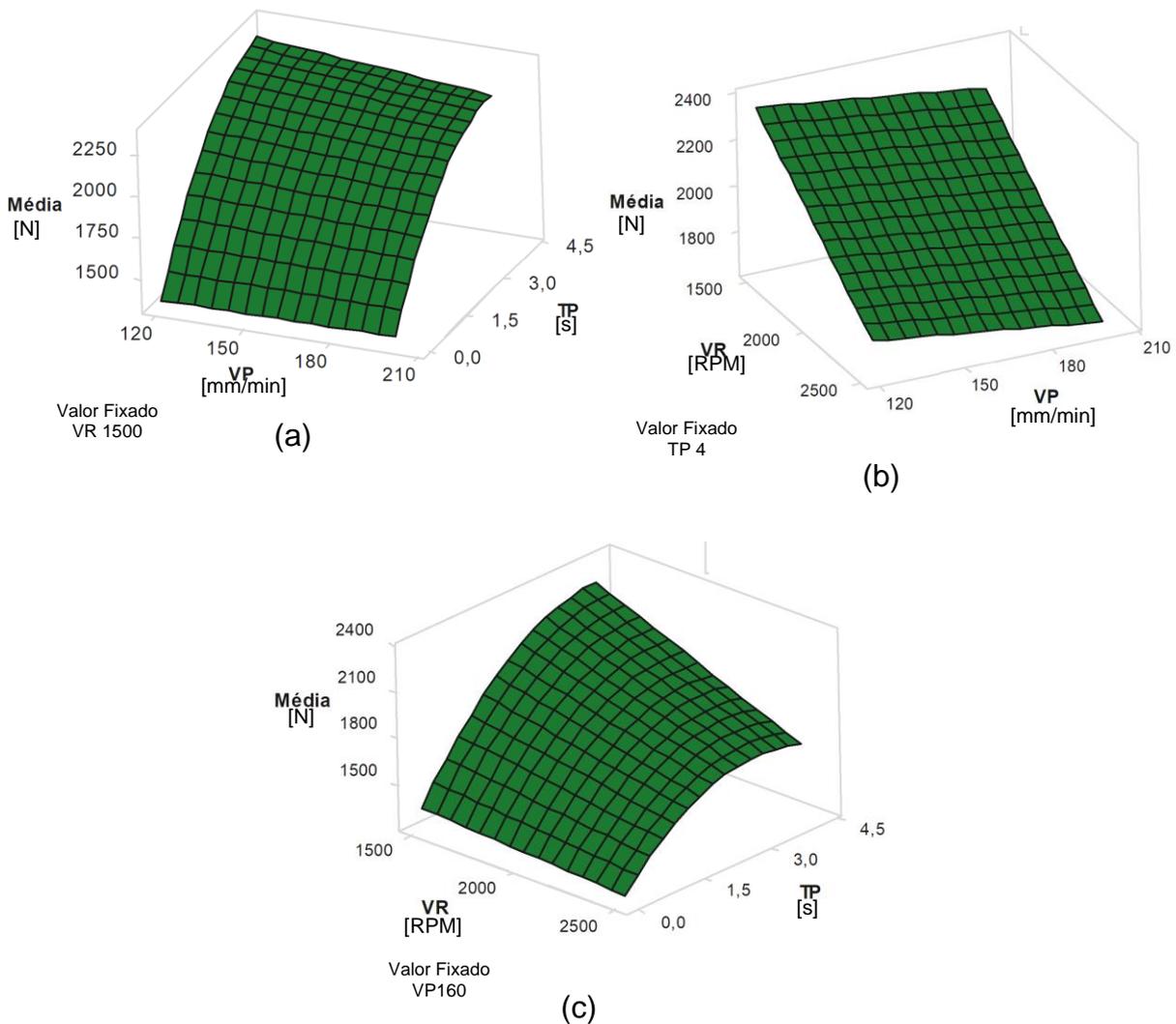
Tabela 11 - Resumo do modelo quadrático modificado

S	$R^2$	$R^2$ (ajustado)
114,732	96,16%	89,75%

Fonte: Próprio autor

Para uma melhor visualização do modelo quadrático foram plotadas as superfícies de resposta, Figura 28, para cada par de parâmetros em relação a resistência ao cisalhamento.

Figura 28 - Superfícies de resposta para modelo quadrático simplificado – testes de Taguchi



Fonte: Próprio autor

Observa-se na Figura 28(a), a qual relaciona velocidade de penetração e tempo de permanência, que a variável VP praticamente não influencia na resposta, enquanto a variável TP tem uma grande significância no resultado. Essas superfícies de

resposta podem ser comparadas aos gráficos dos efeitos principais do método Taguchi, ambos mostrarão os mesmos perfis em relação às respostas. A Figura 28(b) relaciona VR e VP com a média de resultados, é importante visualizar novamente que VP não é um parâmetro relevante, porém o gráfico mostra que, dentro do intervalo estudado, quanto menor for a VR melhor será. Na Figura 28(c) analisa-se VR e VP em relação a resposta, percebe-se que o melhor resultado está na menor rotação e maior tempo de permanência, observa-se também que com o crescimento da velocidade de rotação, o tempo de permanência perde um pouco de sua significância.

De posse dos resultados mencionados, classificou-se como insignificante o parâmetro de velocidade de penetração no intervalo de valores estudados (120, 160 e 200mm/min). Para o prosseguimento do trabalho realizou-se a fixação desse parâmetro e iniciaram-se novamente as soldagens apenas variando, em um fatorial completo, velocidade de rotação e tempo de permanência.

#### 4.1.2 Ensaio de cisalhamento – Combinações de Fatorial completo

Com a finalidade de aumentar a produtividade de soldagem e diminuir tempo/custo de processo foi decidido fixar o parâmetro de VP em 200mm/min e realizar um fatorial completo com as variáveis TP e VR. Na Tabela 12 mostram-se os resultados dos ensaios de cisalhamento das combinações resultantes da aplicação do método fatorial completo.

É possível visualizar, na Figura 29, que os maiores valores de resistência ao cisalhamento estão nas combinações 11 e 12 (1500/2 e 1500/4) porém há uma pequena diferença entre os resultados. Nota-se que quando não há tempo de permanência a resistência diminui drasticamente.

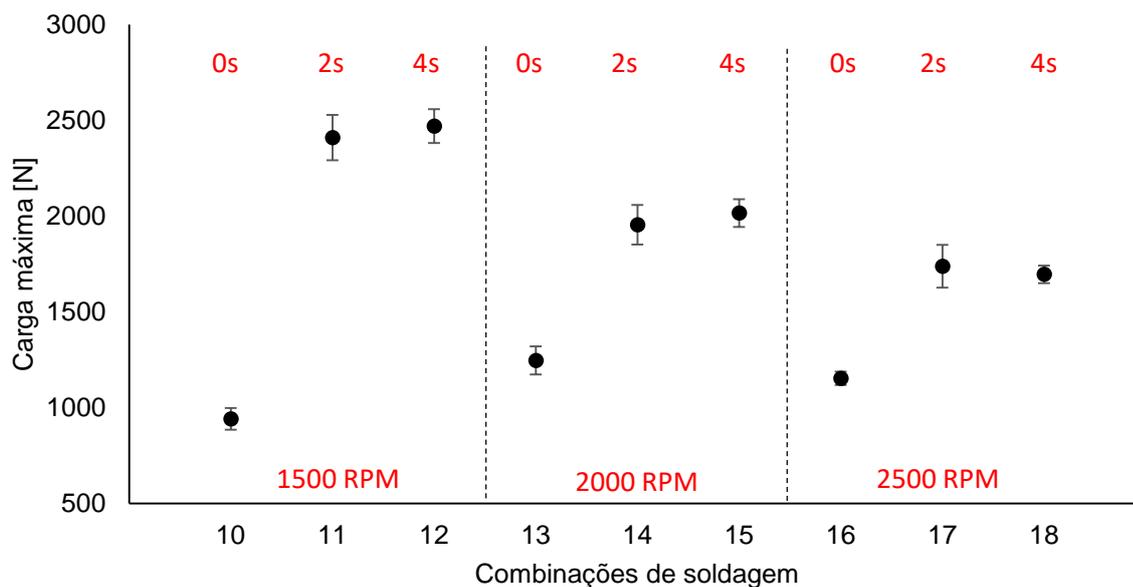
Tabela 12 - Resultados de ensaio de cisalhamento – Fatorial completo

Combinação	Parâmetros		Resposta				Carga média [N]	Desvio padrão [N]
	VR (RPM)	TP (s)	Carga 1 [N]	Carga 2 [N]	Carga 3 [N]	Carga 4 [N]		
10	1500	0	995,7	994,3	860,1	916,6	941,7	56,9
11	1500	2	2274,8	2601,6	2382,8	2381,3	2410,1	118,9
12	1500	4	2587,2	2340,8	2488,5	2464,2	2470,2	87,7
13	2000	0	1266,0	1164,6	1201,9	1357,6	1247,5	73,1
14	2000	2	1945,4	1944,7	2111,2	1819,5	1955,2	103,6
15	2000	4	1956,9	2127,9	1945,9	2034,2	2016,2	72,8
16	2500	0	1209,3	1132,1	1114,9	1157,3	1153,4	35,6
17	2500	2	1905,2	1593,3	1710,9	1742,8	1738,1	111,4
18	2500	4	1763,4	1641,2	1710,7	1671,0	1696,6	45,7

Fonte: Próprio Autor

Na Figura 29 é notório que em VR de 2500RPM (Combinações 16, 17 e 18) o acréscimo de TP de 2 para 4s não é satisfatório, pois com 4s de TP temos um decréscimo da carga ao cisalhamento. Se considerarmos apenas a carga máxima atingida (resistência) e pensarmos em produtividade, ou seja, menor tempo de processo, escolheríamos os resultados com 2s de TP.

Figura 29 - Resistência ao cisalhamento em termos da carga máxima medida nos ensaios de cisalhamento – Fatorial completo



Fonte: Próprio autor

Na Tabela 13 tem-se a ANOVA para o fatorial completo. O valor do tempo de permanência foi o valor mais significativo para o experimento. O TP obteve uma contribuição de 57,69%, VR 10,89% e a interação entre VR\*TP 10,42%.

Tabela 13 - Tabela ANOVA para o efeito dos parâmetros de soldagem na resistência ao cisalhamento – Fatorial completo

	Graus de Liberdade	Seq SS	Contribuição	Adj SS	Adj MS	F-Valor	P-Valor
<b>VR</b>	1	253749	10,89%	3973	3973	0,04	0,848
<b>TP</b>	1	1344567	57,69%	510692	510692	5,22	0,071
<b>VR * TP</b>	1	242724	10,42%	242724	242724	2,48	0,176
<b>Resíduo</b>	5	489452	21,00%	489452	97890		
<b>Total</b>	8	2330493	100,00%				

Fonte: Próprio autor

Após a apresentação dos resultados, buscou-se encontrar uma equação que mostrasse o modelo de regressão para o experimento estudado. Para isso, utilizamos modelos empíricos com coeficiente de determinação >90%. Após algumas otimizações chegou-se ao modelo mostrado na Equação 5, o qual é um modelo de 2ª ordem simplificado. O coeficiente de determinação está mostrado na Tabela 14.

$$R_{\max} = 1114,2 + 1127.TP - 111,7.TP^2 - 0,2219.VR.TP \quad [N] \quad (5)$$

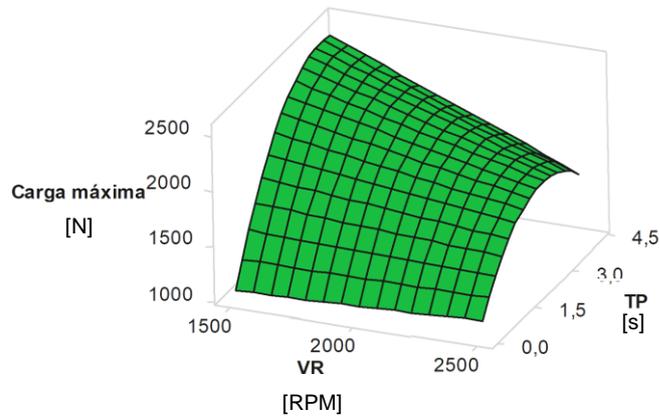
Tabela 14 - Resumo do modelo quadrático simplificado – Fatorial completo

S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)	PRESS	R <sup>2</sup> (previsto)
150,192	96,13	92,26%	563865	75,8%

Fonte: Próprio autor

Para uma melhor avaliação plotou-se a superfície de resposta, mostrada na Figura 30, a qual é muito parecida com a plotada via método Taguchi. Maiores valores de carga são encontrados em soldas realizadas com menores velocidades de rotação e maiores tempo de permanência. Em maiores velocidades de rotação, o melhor valor para resistência ao cisalhamento não se deu no maior tempo de permanência.

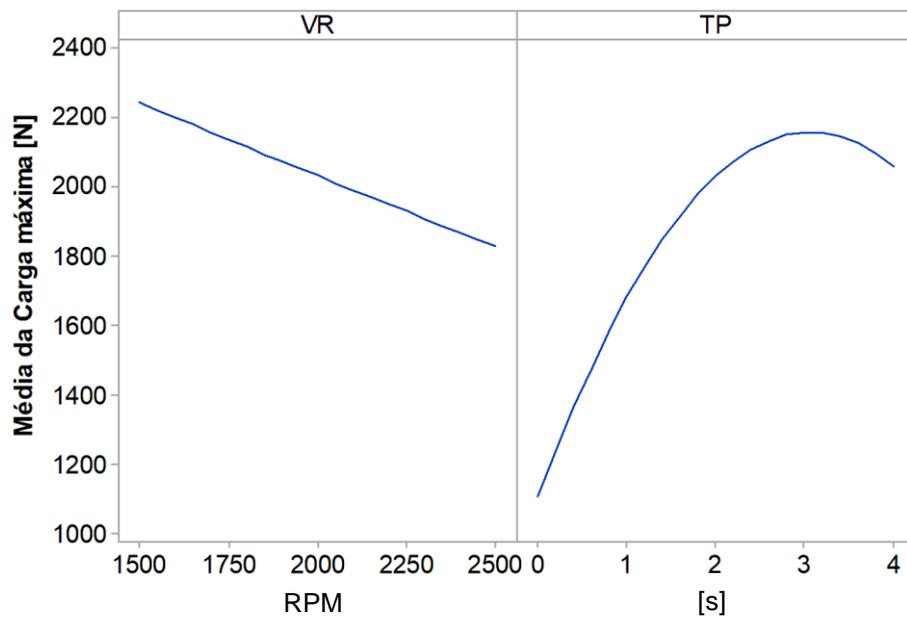
Figura 30 - Superfície de resposta – Fatorial completo



Fonte: Próprio autor

A Figura 31 analisa individualmente os efeitos dos parâmetros VR e TP, no na resistência ao cisalhamento.

Figura 31 – Análise individual do efeito dos parâmetros na carga máxima suportada



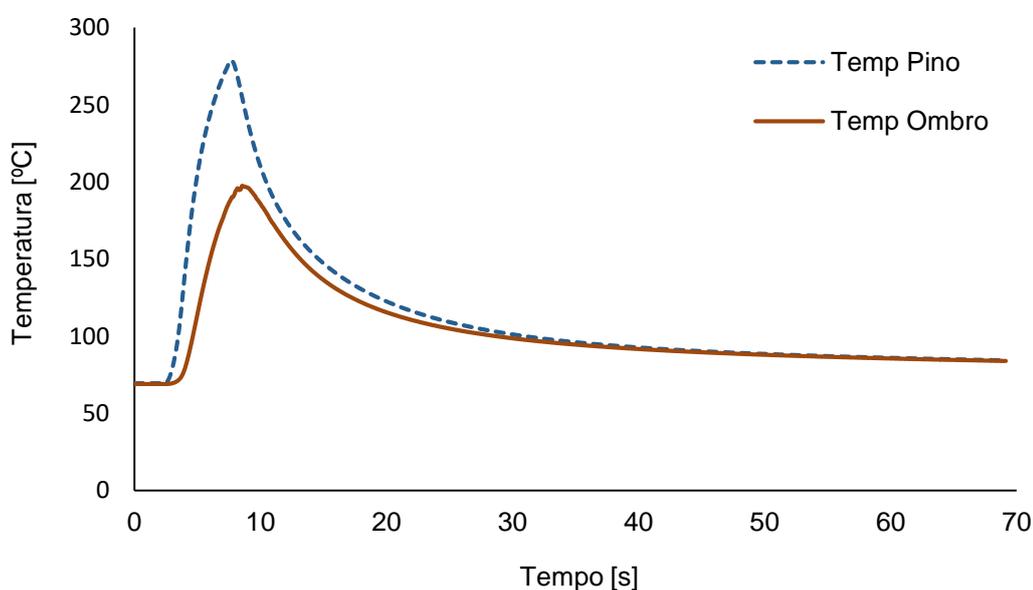
Fonte: Próprio autor

## 4.2 Ciclo de temperatura no processo de soldagem

O conhecimento do ciclo de temperatura no processo de soldagem pode auxiliar no entendimento das relações entre características microestruturais e propriedades mecânicas da junta soldada.

As medições de temperatura foram realizadas na parte inferior da área de sobreposição das chapas, em dois pontos: sob a posição do pino e outro sob a posição do ombro, como mostrado na Figura 16. A Figura 32 mostra o perfil de temperatura durante a soldagem da amostra de combinação 18 (2500/4). Nota-se a diferença de temperatura entre o termopar localizado nas proximidades do pino e o localizado na posição do ombro. Os demais perfis de temperatura estão localizado no anexo III.

Figura 32 - Perfil de temperatura vs Tempo (Combinação 18 – 2500/4)



Fonte: Próprio autor

A Tabela 15 mostra as temperaturas máximas medidas pelos dois termopares, assim como o seu respectivo desvios-padrões.

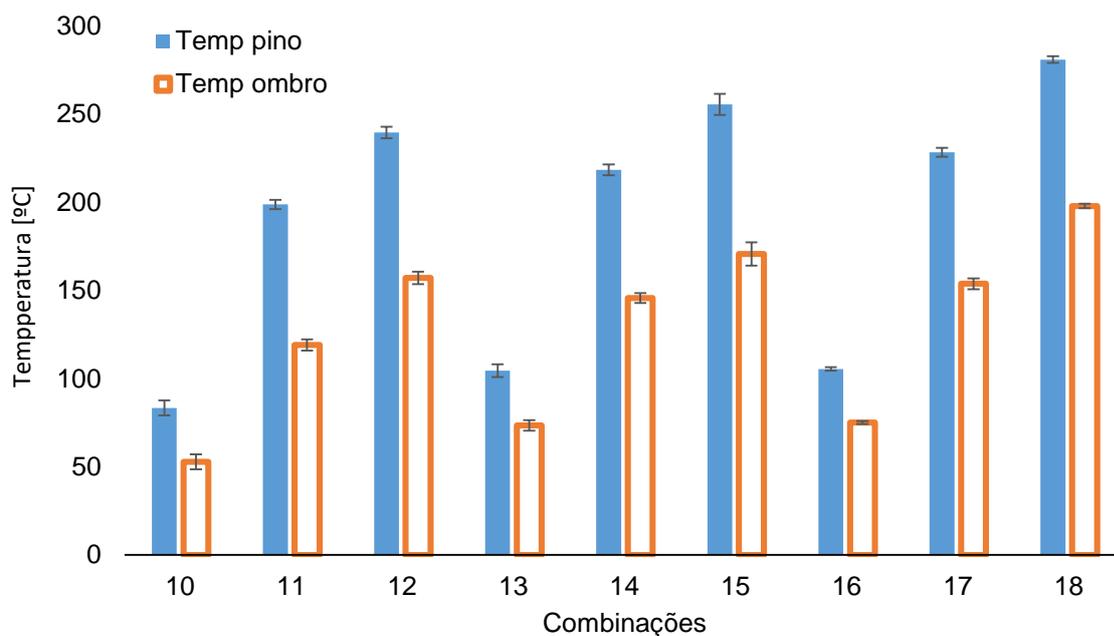
Tabela 15 - Temperatura máxima pino e ombro

Amostras	Parâmetros		Temperatura média máxima do pino [°C]	Desvio padrão pino [°C]	Temperatura média máxima do ombro [°C]	Desvio padrão ombro [°C]
	VR (RPM)	TP (s)				
10	1500	0	83,3	4,3	52,8	4,2
11	1500	2	198,7	2,7	119,0	3,1
12	1500	4	239,5	3,3	157,0	3,5
13	2000	0	104,4	3,6	73,4	3,0
14	2000	2	218,3	3,0	145,7	2,8
15	2000	4	255,4	6,0	170,6	6,6
16	2500	0	105,4	1,0	75,1	0,8
17	2500	2	228,2	2,6	153,7	3,1
18	2500	4	280,8	1,9	197,8	1,3

Fonte: Próprio autor

Na Figura 33 plotou-se o gráfico com os dados da Tabela 15, dessa maneira fica mais fácil verificar que com o acréscimo do tempo de permanência da ferramenta de 0 para 2s a temperatura nos pontos medidos sobe aproximadamente 100°C.

Figura 33 - Temperatura máxima medida - Pino e Ombro



Fonte: Próprio autor

A Tabela 16 e Figura 17 mostram as contribuições das variáveis nas respostas temperatura do ombro e temperatura do pino. A contribuição dessas variáveis quase chega a 90%.

Tabela 16 - ANOVA temperatura do ombro

	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Seq SS</b>	<b>Contribuição</b>	<b>Adj SS</b>	<b>Adj MS</b>	<b>F-Valor</b>	<b>P-Valor</b>
<b>VR</b>	1	1590,3	8%	1590	1590	10,47	0,018
<b>TP</b>	1	17519	88%	17519	17519	115,35	0
<b>Resíduo</b>	5	911,3	5%	911,3	151,9		
<b>Total</b>	8	20020	100%				

Fonte: Próprio autor

Tabela 17 - ANOVA temperatura pino

	<b>Graus de Liberdade</b>	<b>Seq SS</b>	<b>Contribuição</b>	<b>Adj SS</b>	<b>Adj MS</b>	<b>F-Valor</b>	<b>P-Valor</b>
<b>VR</b>	1	1440	3,3%	1440	1440	2,96	0,136
<b>TP</b>	1	38801	89,9%	38801	38801	79,71	0
<b>Resíduo</b>	6	2921	6,7%	2921	486,8		
<b>Total</b>	8	43162	100,00%				

Fonte: Próprio autor

Modelagem superfície de resposta para a temperatura – Fatorial Completo (2<sup>3</sup>):

De posse dos resultados buscou-se uma equação que demonstrasse como a temperatura é afetada pelas variáveis VR e TP. Para isso utilizou-se métodos empíricos para encontrar um modelo de regressão linear para a temperatura do ombro e pino. Após algumas otimizações chegou-se no modelo da Equação 6 para a temperatura do Pino e Equação 7 para temperatura do ombro.

$$\text{Temperatura no pino} = 48,1 + 0,0310 \text{ VR} + 40,21 \text{ TP} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (6)$$

$$\text{Temperatura no Ombro} = 8,1 + 0,0326 \text{ VR} + 27,02 \text{ TP} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (7)$$

A Tabela 18 mostra o resumo do modelo para a Equação 6 e a Tabela 19 mostra o resumo do modelo para a Equação 7

Tabela 18 - Resumo modelo temperatura do pino

S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)	PRESS	R <sup>2</sup> (previsto)
22,0636	93,23%	90,98%	6171,64	85,70%

Fonte: Próprio autor

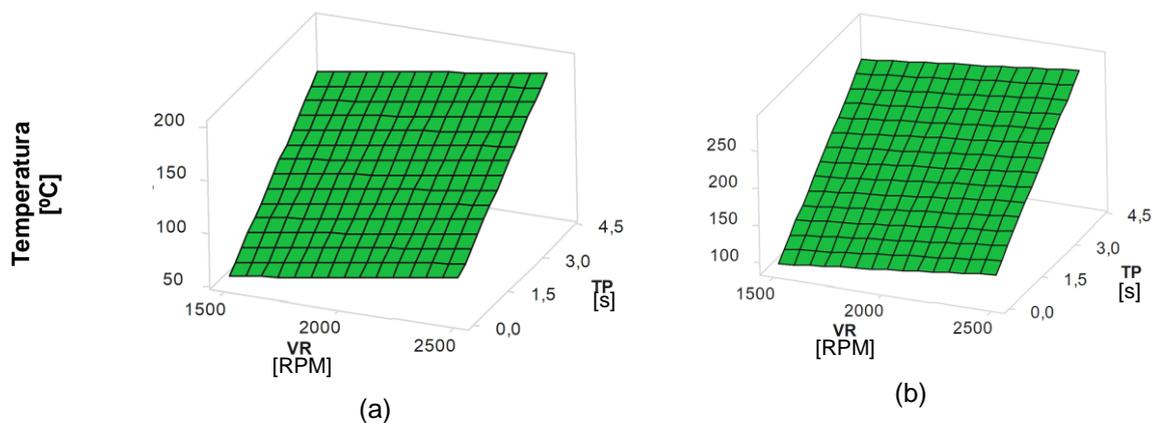
Tabela 19 - Resumo modelo temperatura do ombro

S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ajustado)	PRESS	R <sup>2</sup> (previsto)
12,3239	95,45%	93,93%	1906,6	90,48%

Fonte: Próprio autor

A Figura 34 mostra a superfície de resposta para temperatura do ombro (a) e do pino (b). As duas figuras têm o mesmo formato, pois, a única diferença entre os resultados é o local de medição do termopar. Maiores temperaturas estão na maior rotação e maior tempo de permanência.

Figura 34 - Superfície de resposta para temperatura (a) do ombro (b) do pino

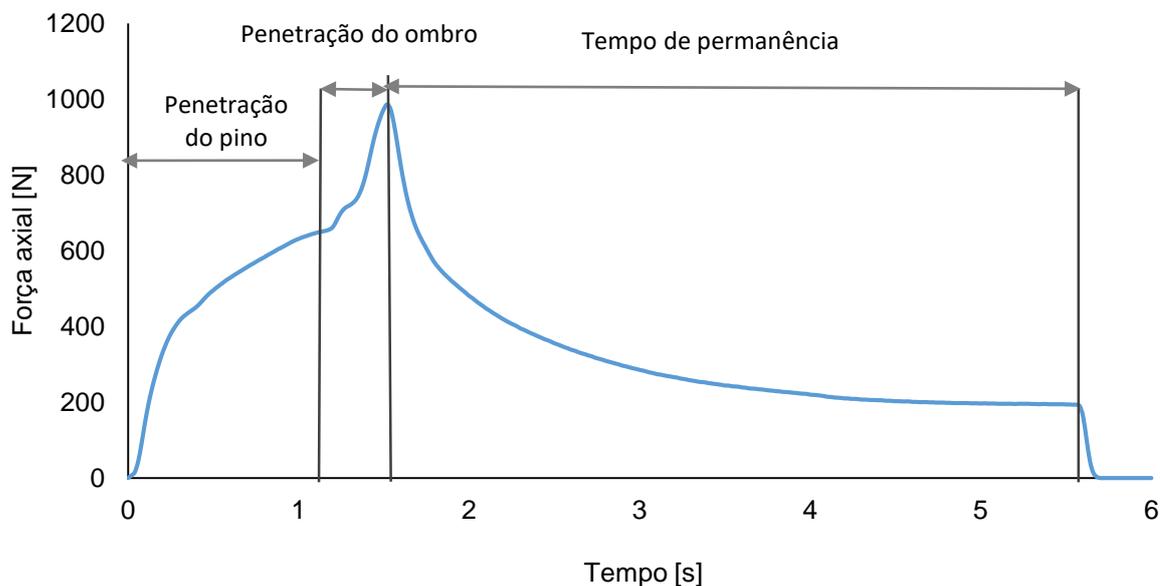


Fonte: Próprio autor

### 4.3 Força axial de soldagem

A Figura 35 mostra as etapas do processo de soldagem, baseado no perfil de força axial de soldagem. Inicialmente ocorre a penetração do pino, observa-se um aumento da força, no segundo momento o ombro encosta na superfície da chapa superior ocasionando um aumento significativo da força axial, pois o ombro tem uma área de contato maior que o pino. Após o contato do ombro, a ferramenta fica parada por 4s no final do seu percurso, esse período é o tempo de permanência. Durante o tempo de permanência a força axial diminui devido ao fato do material ter amolecido e diminuído sua resistência. No final do processo de soldagem a ferramenta é retirada rapidamente, e a força axial cai a zero rapidamente. No anexo III encontram-se os perfis de força axial para todas as condições de soldagem.

Figura 35 - Perfil de força axial no processo de soldagem (Combinação 12: 1500/4)



Fonte: Próprio autor

A Tabela 20 mostra os resultados de cada combinação para a força axial máxima de soldagem aplicada pela máquina durante o processo. É notório que a variação da rotação não altera significativamente o valor da força axial máxima atingida no processo de soldagem. Para VR de 2000 e 2500RPM os valores de carga

foram muito próximos. Observa-se também a variação do TP não tem importância no resultado.

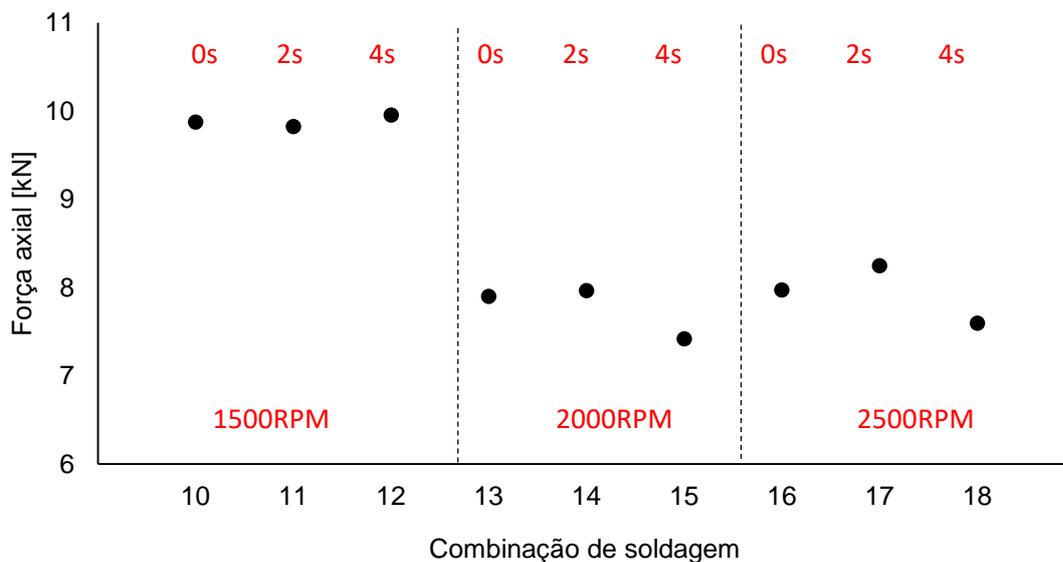
Tabela 20 - Resultados da força axial de soldagem

Combinação	Parâmetros		Média da força axial máxima [kN]	Desvio padrão [N]
	VR (RPM)	TP (s)		
10	1500	0	9,86	53,15
11	1500	2	9,82	
12	1500	4	9,94	
13	2000	0	7,89	242,71
14	2000	2	7,95	
15	2000	4	7,41	
16	2500	0	7,96	267,72
17	2500	2	8,24	
18	2500	4	7,29	

Fonte: Próprio autor

A Figura 36 ilustra o comportamento da força axial de soldagem com a variação das combinações. Observa-se que há uma pequena diferença nos valores, de força axial máxima para as rotações de 2000 e 2500RPM. Para a rotação de 1500RPM foi necessário aproximadamente 2kN a mais que nas outras rotações.

Figura 36 - Força axial máxima para cada combinação de soldagem

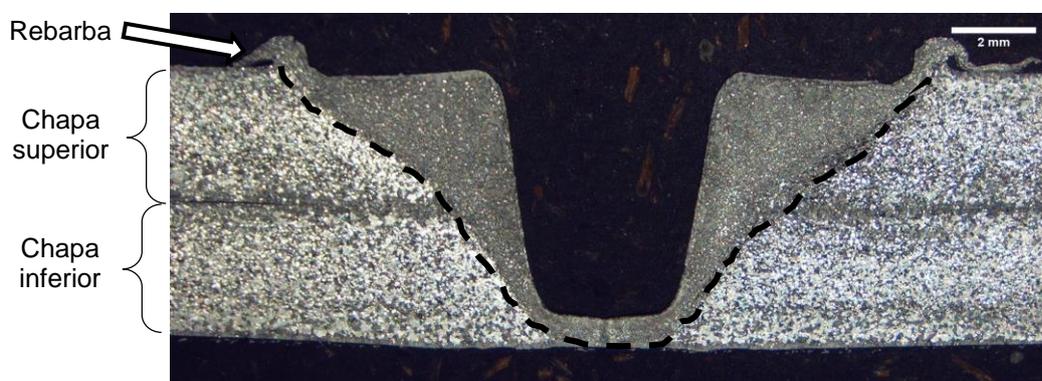


Fonte: Próprio autor

#### 4.4 Macrografias das juntas soldadas

Na Figura 37 tem-se a macrografia da combinação 12: 1500/4. É possível notar a zona de mistura bem demarcada, assim como a interface das chapas e o perfil deixado pela ferramenta de soldagem. Nota-se também a rebarba deixada pela ação do ombro na chapa superior.

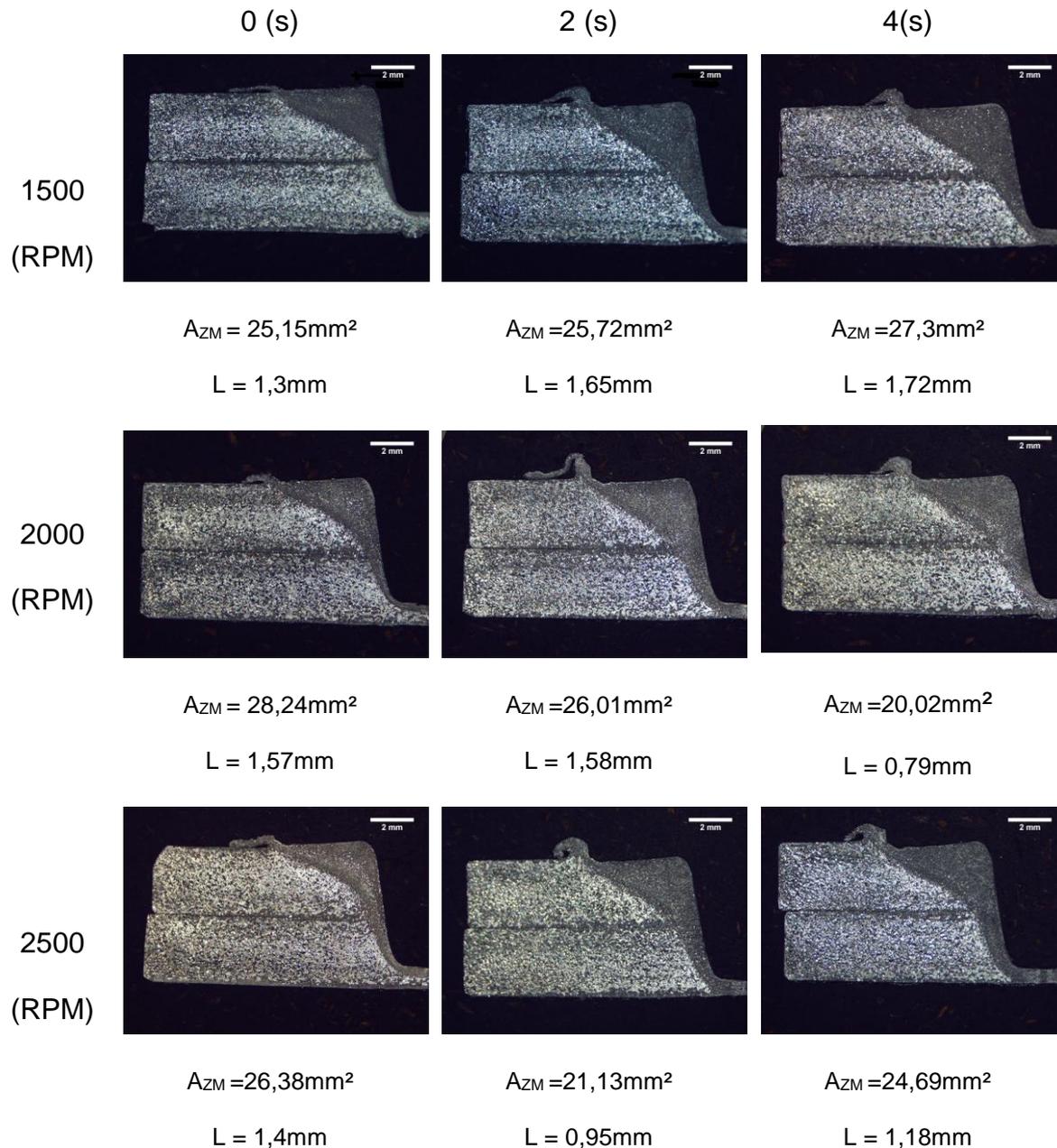
Figura 37 - Macrografia de um ponto de solda (1500/4)



Fonte: Próprio autor

Na Figura 38 tem-se as macrografias de todas as combinações de soldagem estudadas (devido a simetria da ZM, apenas a metade da solda é mostrada). Na horizontal se tem as macrografias divididas por rotações, enquanto na vertical mostram-se divididas por tempo de permanência. Observa-se que o tempo de permanência aumenta o tamanho da ZM em amostras com rotação de 1500 RPM. Em outras rotações não se consegue atribuir um aumento ou diminuição de ZM. Abaixo de cada macrografia tem-se a área da ZM para cada combinação, a qual mostra, em valores de área e largura da ZM que não há uma relação direta entre rotações e tempo de permanência na ZM.

Figura 38 - Macrografias de todas as combinações



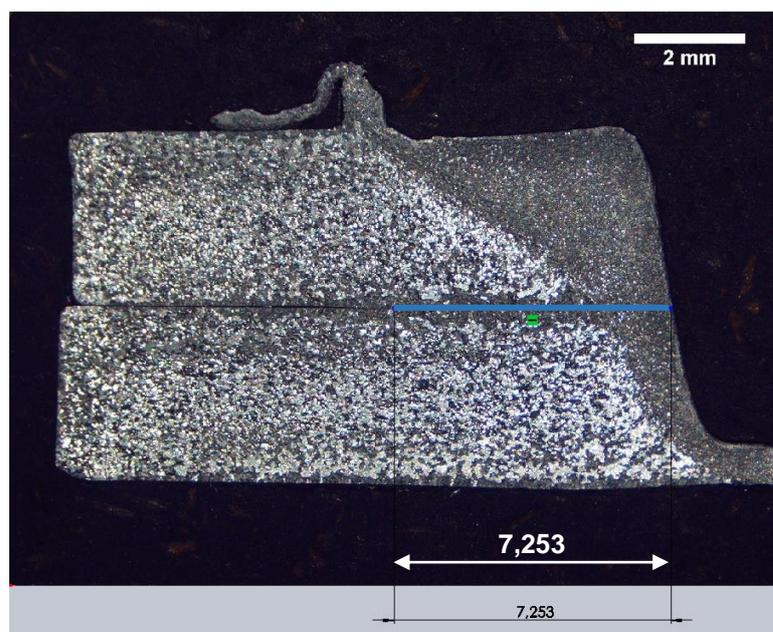
Fonte: Próprio autor

#### 4.5 Medições da largura soldada e parcialmente soldada

Na Tabela 21 tem-se a listagem da largura da zona soldada + parcialmente soldada medida com auxílio do software *Solid Works*. Como mostrado na Figura 39, esse resultado é suscetível a erros de medição, pois é difícil mensurar exatamente

aonde acaba a zona parcialmente soldada. Os dados da Tabela 21 mostram que existe uma correlação entre a carga máxima suportada no ensaio de cisalhamento e a largura das duas zonas.

Figura 39 – Demonstração da medição da largura soldada e parcialmente soldada



Fonte: Próprio autor

Tabela 21 - Largura da zona soldada e parcialmente soldada

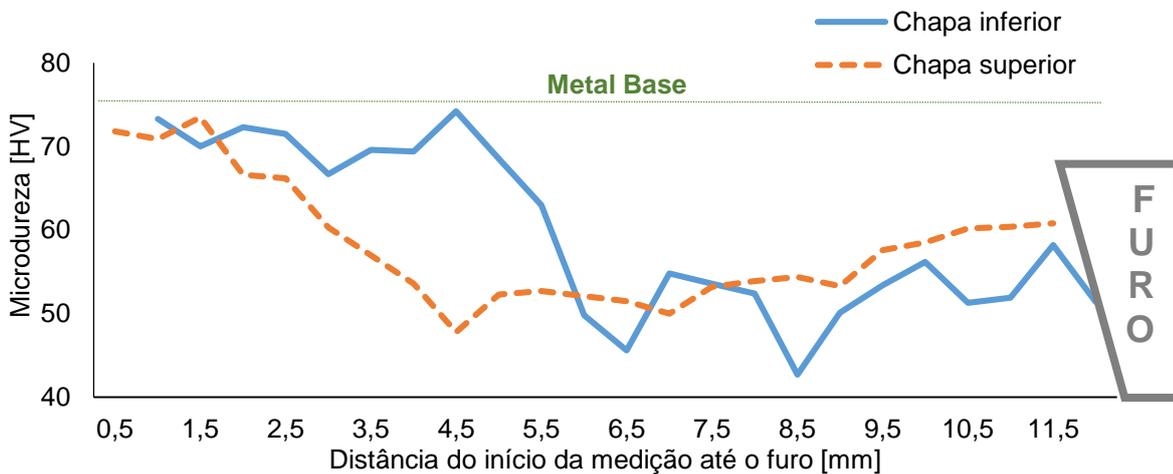
Amostras	Parâmetros		Largura soldada + parcialmente soldada [mm]	Média da carga máxima suportada [N]
	VR (RPM)	TP (s)		
10	1500	0	4,186	941,7
11	1500	2	8,1	2410,1
12	1500	4	7,94	2470,2
13	2000	0	4,74	1247,5
14	2000	2	7,25	1955,2
15	2000	4	7,85	2016,2
16	2500	0	5,26	1153,4
17	2500	2	7,59	1738,1
18	2500	4	8,71	1696,6

Fonte: Próprio autor

#### 4.6 Microdureza

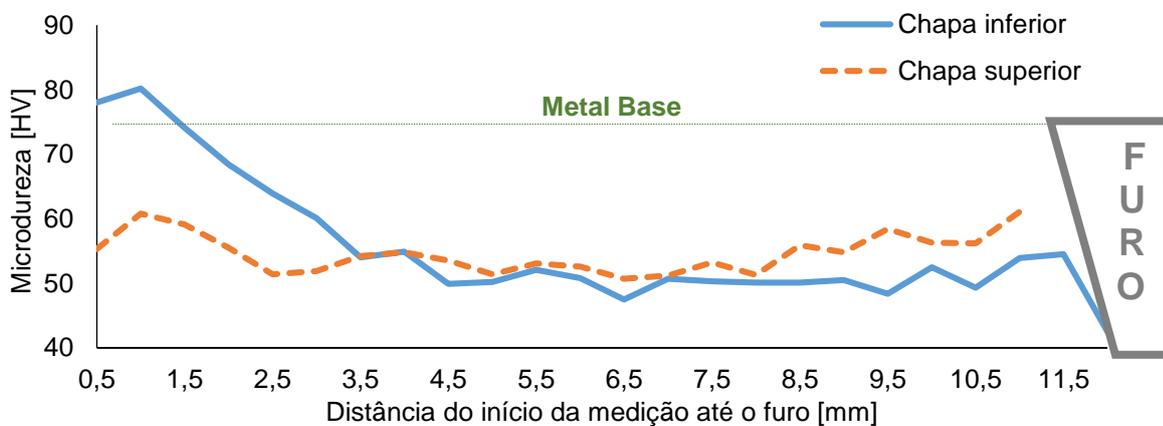
As Figura 40 até Figura 48 mostram os perfis de microdureza medidos nas amostras produzidas no estudo fatorial completo. Os perfis foram medidos na metade da espessura das chapas superior e inferior. Devido a simetria, os perfis são apresentados para apenas um dos lados da amostra. No lado direito de cada perfil está representada esquematicamente a localização do furo. Em todas as amostras observou-se diminuição da microdureza em relação ao metal base.

Figura 40 - Perfil de microdureza da amostra 10 (1500/0)



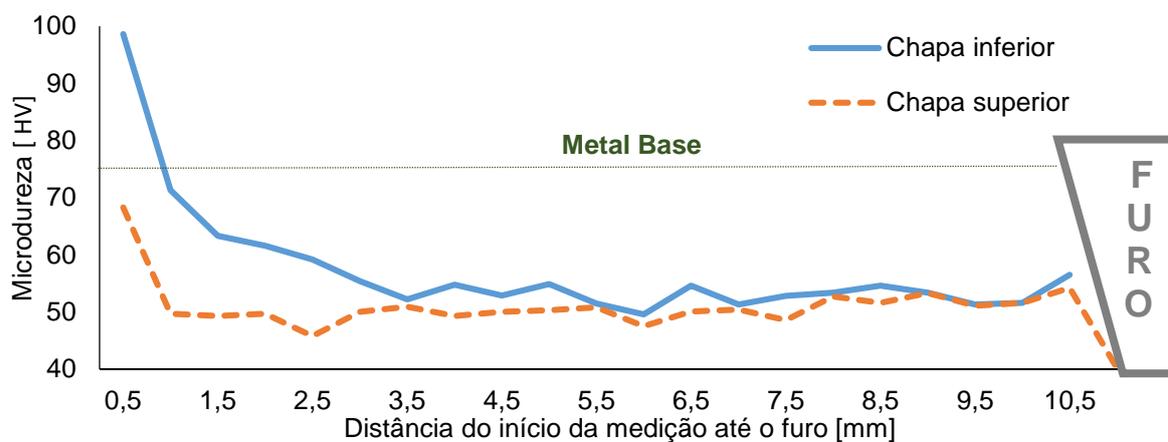
Fonte: Próprio autor

Figura 41 - Perfil de microdureza da amostra 11 (1500/2)



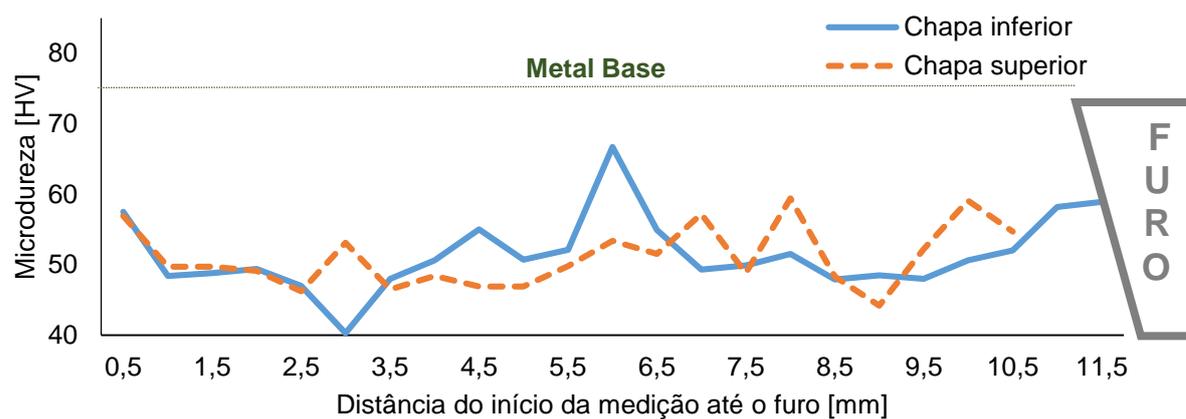
Fonte: Próprio autor

Figura 42 - Perfil de microdureza da amostra 12 (1500/4)



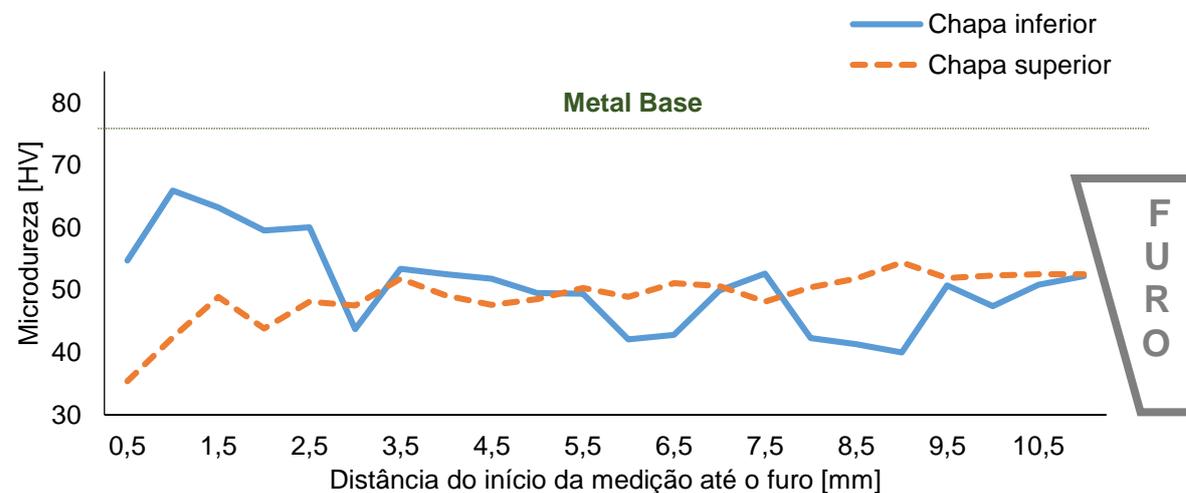
Fonte: Próprio autor

Figura 43 - Perfil de microdureza da amostra 13 (2000/0)



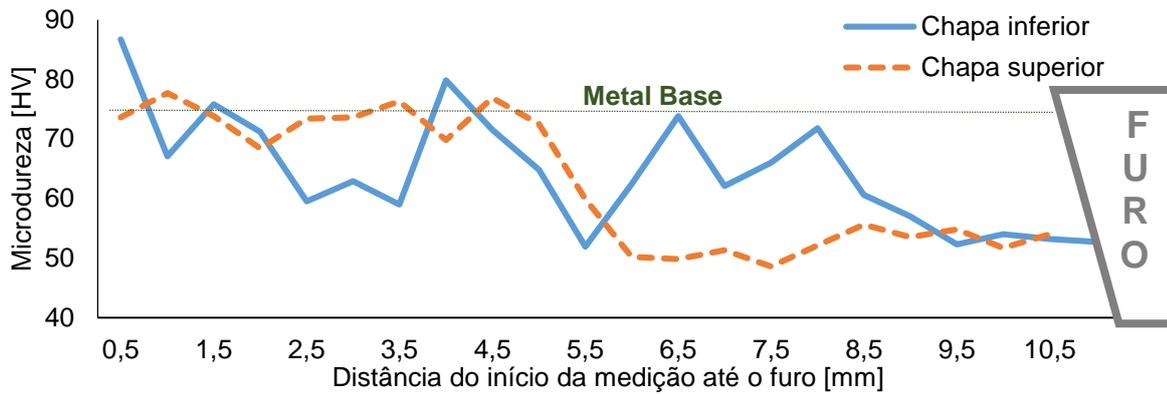
Fonte: Próprio autor

Figura 44 - Perfil de microdureza amostra 14 (2000RPM/2s)



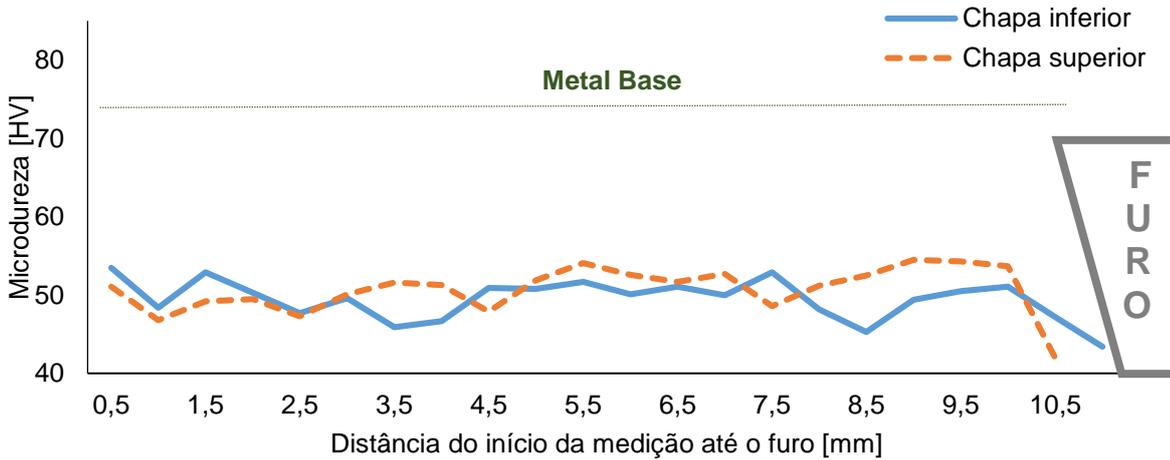
Fonte: Próprio autor

Figura 45 - Perfil de microdureza da amostra 15 (2000/4)



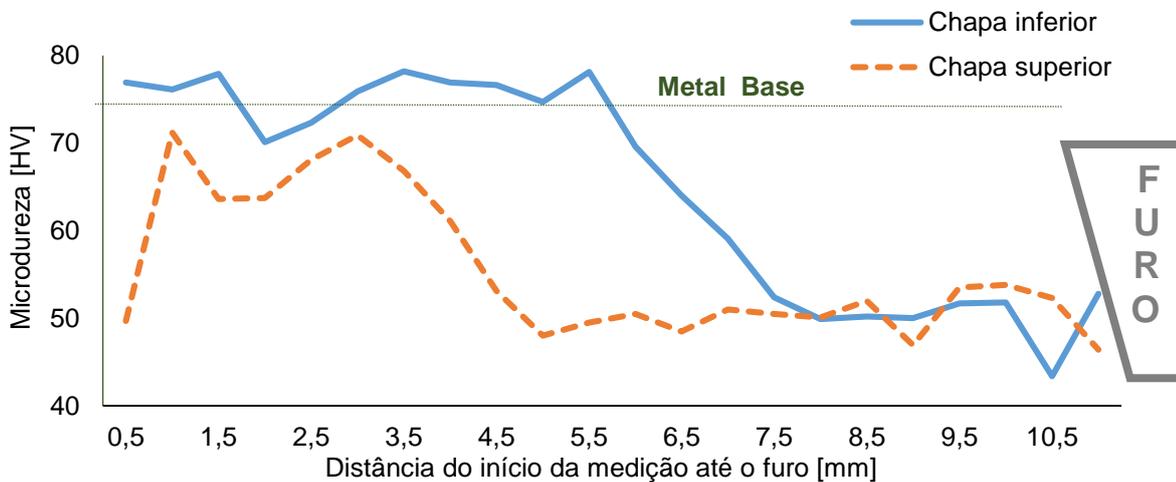
Fonte: Próprio autor

Figura 46 - Perfil de microdureza da amostra 16 (2500/0)



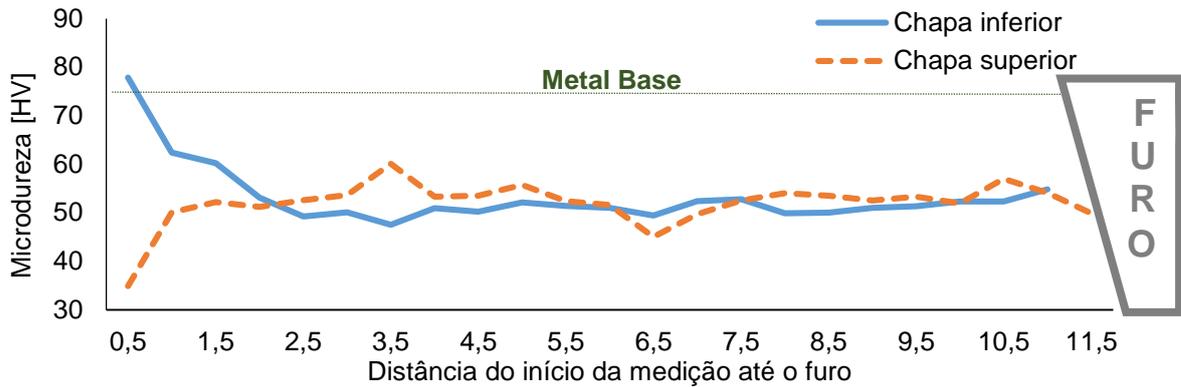
Fonte: Próprio autor

Figura 47 - Perfil de microdureza da amostra 17 (2500/2)



Fonte: Próprio autor

Figura 48 - Perfil de microdureza amostra 18 (2500/4s)

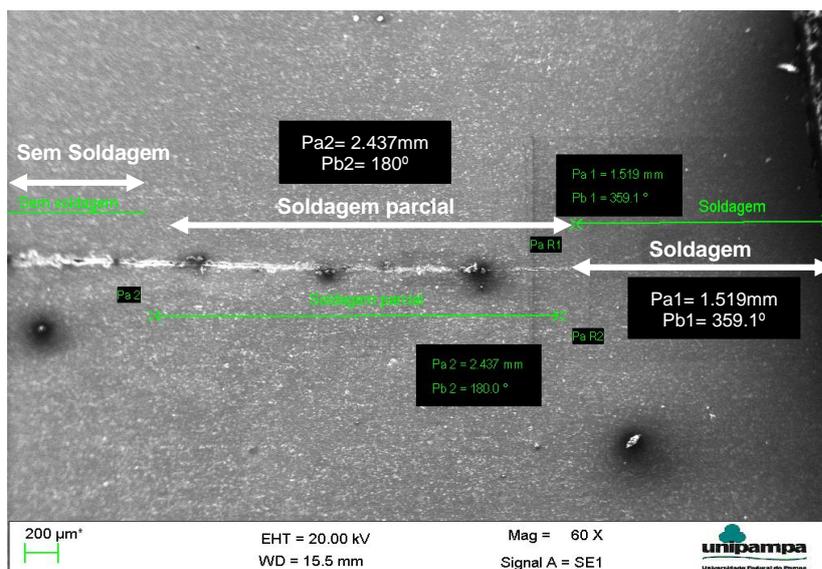


Fonte: Próprio autor

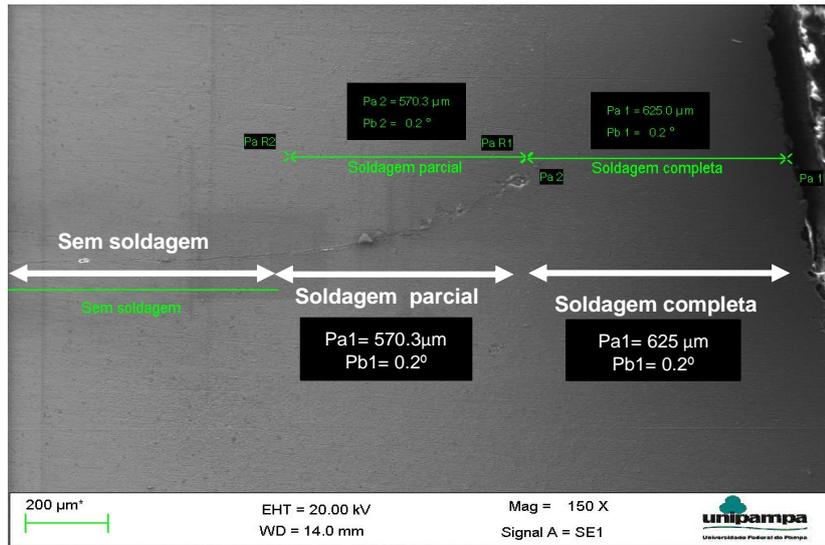
#### 4.7 Medição da seção resistente

Para as juntas mais discrepantes em termos de resistência ao cisalhamento foi feita a medição da seção resistente das soldas. Na Figura 49 (a) observa-se uma extensão da área soldada e da área parcialmente soldada de aproximadamente 4mm. Já na Figura 49 (b) as duas regiões somam aproximadamente 1,3mm.

Figura 49 - Medida das regiões soldada e parcialmente soldada: (a) amostra 12 (1500/4) e (b) amostra 16 (2500/0)



(a)



(b)

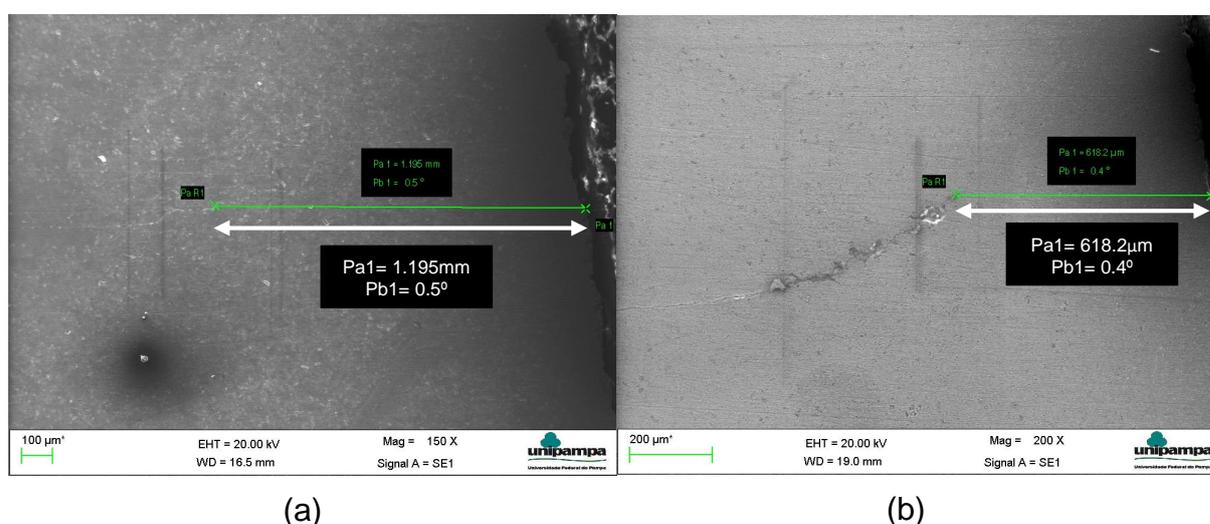
Fonte: Próprio autor

## 5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

### 5.1 Desempenho mecânico das amostras

É possível notar que os dois melhores resultados de resistência ao cisalhamento ocorrem para VR de 1500RPM com 2 e 4s de TP, como mostrado na Figura 29. Em rotações maiores e com os mesmos TP os valores de resistência ao cisalhamento caíram aproximadamente 500N. No estudo de (PATHAK, BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2012) observou-se que com um TP de 4s e penetração de ferramenta constante, a resistência ao cisalhamento aumenta com a VR até um determinado patamar a partir do qual começa a cair. Em maiores VR o defeito geométrico chamado de “gancho” tende a subir e ir em direção ao furo, diminuindo a área soldada e facilitando a propagação da trinca durante o ensaio de cisalhamento (YUAN, MISHRA, *et al.*, 2011). Nesse trabalho também se observou a diferença entre as geometrias do gancho, mencionada por (YUAN, MISHRA, *et al.*, 2011), como se pode ver na Figura 50 para as amostras 12 e 16. Destaca-se que na amostra 12 o gancho é praticamente inexistente.

Figura 50 - Diferenças entre os ganchos entre as amostras: (a) combinação 12 - 1500/4 e (b) combinação 16 - 2500/0



Fonte: Próprio autor

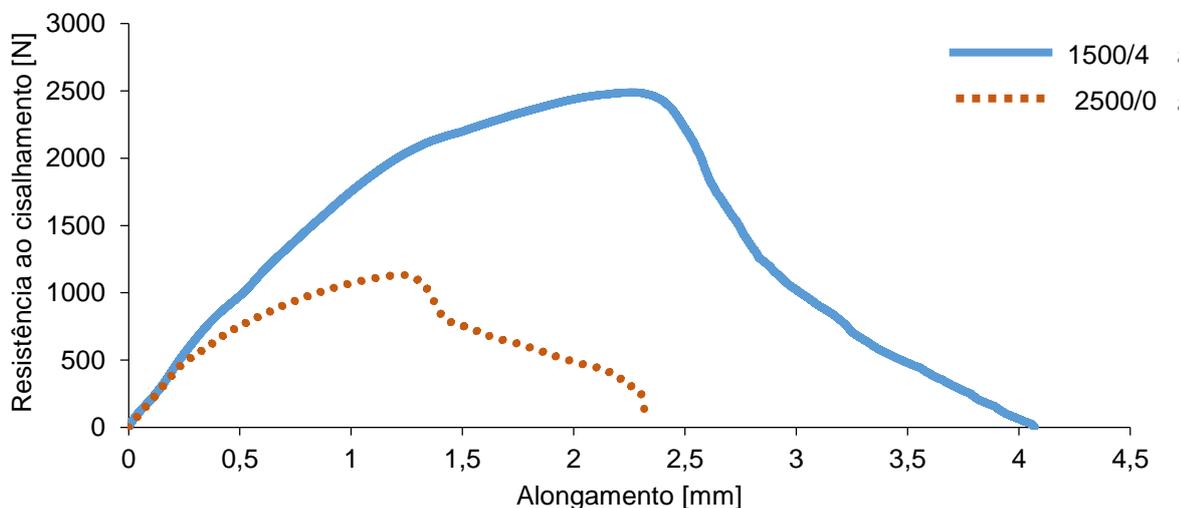
Estudando o efeito da VR na resistência de uma junta soldada por FSSW (JONCKHEERE e MEESTER, 2012), concluíram que altas VR sempre promovem soldas com altas temperaturas, porém altas temperaturas de soldagem proporcionam baixos valores de resistência ao cisalhamento. Em seu trabalho sobre juntas FSpW (TIER, ROSENDO, *et al.*, 2013) observaram que soldas produzidas com VR mais baixas (900RPM) apresentaram resistência maior em relação a soldas produzidas com VR maiores (1900RPM).

Soldas produzidas com pequeno tempo de soldagem, acompanhado de alta velocidade de rotação, produzem juntas soldadas de baixa resistência. Nessas condições a adesão na zona parcialmente soldada é fraca (ROSENDO, TIER, *et al.*, 2015).

Neste trabalho, a largura da zona parcialmente soldada e zona soldada, é muito superior na amostra 12 em comparação com a amostra 16, totalizando uma diferença de aproximadamente 2,7mm. A Figura 49 detalha a diferença entre a amostra 12 (1500/4) e amostra 16 (2500/0), as quais são a melhor e segunda pior combinação para o ensaio de cisalhamento.

A combinação 12 (1500/4) resultou em uma maior área abaixo do gráfico, o que indica uma maior tenacidade, ou seja, é necessário um maior aporte de energia mecânica para levar a junta à falha. A Figura 51 mostra o gráfico de força x alongamento, medidos nos ensaios de cisalhamento, para as amostras 12 e 16.

Figura 51 - Comparação do gráfico de força vs alongamento das amostras 12 e 16



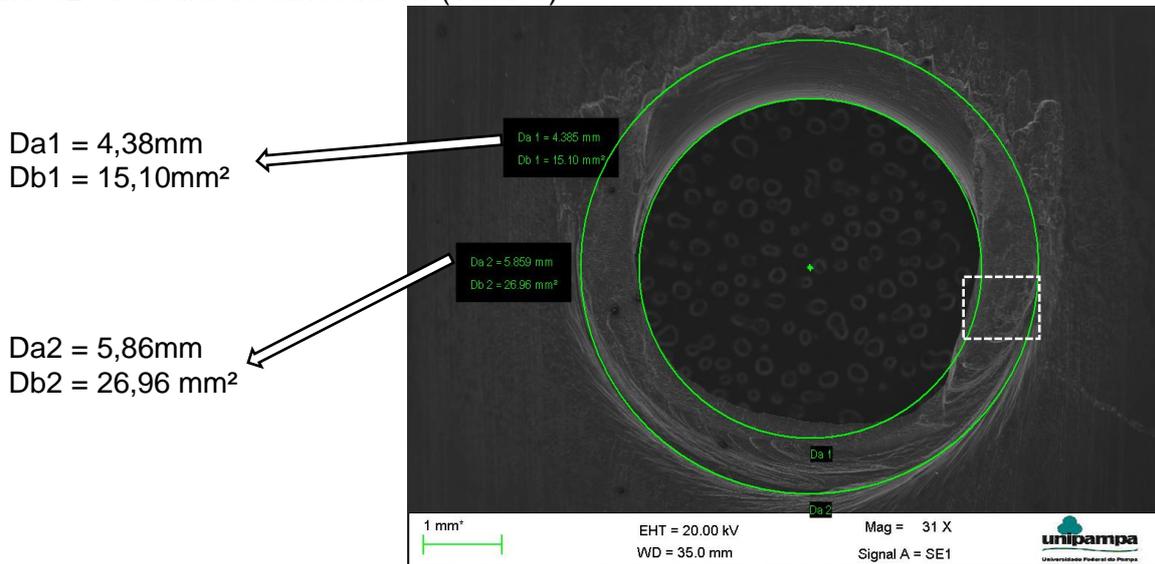
Os resultados da medição da área e largura da ZM, Figura 38, não mostraram coerência com os resultados do ensaio de cisalhamento. Alguns estudos sugerem que quanto maior a ZM maior será a área soldada, porém nesse estudo não se chegou a tal conclusão. Em contraste a isso, na Tabela 21, a largura soldada + parcialmente soldada mostrou ser mais adequada para ser relacionada com a resistência mecânica das juntas soldadas, como já observado por (TIER, ROSENDO, *et al.*, 2013).

Em termos de microdureza observou-se para todas as amostras uma microdureza menor em relação ao metal base, possivelmente devido ao envelhecimento na liga, como já observado por outros autores (DONG, SUN e LI, 2013) (FU, ZHANG, *et al.*, 2013). As amostras que apresentaram um perfil de microdureza mais plano, também tiveram o melhor resultado no ensaio de cisalhamento como pode-se ver na Figura 42. As amostras de maior resistência ao cisalhamento (amostras 11 e 12) mostraram os perfis de microdureza mais planos de todo o experimento. O perfil de microdureza mais plano dessas amostras demonstra que o aporte térmico atingiu regiões mais distantes do centro do botão de solda. Ademais, a menor microdureza, indica um ganho em termos de ductilidade e tenacidade para o material, o que explica o melhor desempenho mecânico dessas amostras. Em todas as amostras, conforme a medição se aproxima do furo, a microdureza diminui. Nas piores amostras do ensaio de cisalhamento, amostras 10, 13 e 16, o perfil de microdureza não mostrou uma planicidade. Em seu trabalho (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006) observaram para a liga AA7075-T6 que a microdureza decresceu a uma distância de 2 a 3 mm da periferia do furo. Em soldas FSSW existe uma relação inversa entre dureza e resistência ao cisalhamento na ZM (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014) mostrou que há.

A Figura 52 e Figura 53 mostram as superfícies de fratura das chapas inferiores das combinações 10 (1500/0) e 12 (1500/4), observadas com microscopia eletrônica de varredura. Com estas imagens é possível fazer uma avaliação mais efetiva da seção resistente das juntas soldadas. O aspecto de fratura é o mesmo nas duas amostras, porém com uma maior área soldada para a amostra 12, o que pode ser comprovado observando os valores dos diâmetros mostrados em ambas as figuras. A diferença entre as áreas soldadas é expressiva, aproximadamente 45%, e se mostra bastante coerente com a discrepância entre os valores de resistência ao cisalhamento das duas amostras. Nas imagens é possível notar uma rebarba na direção do ensaio

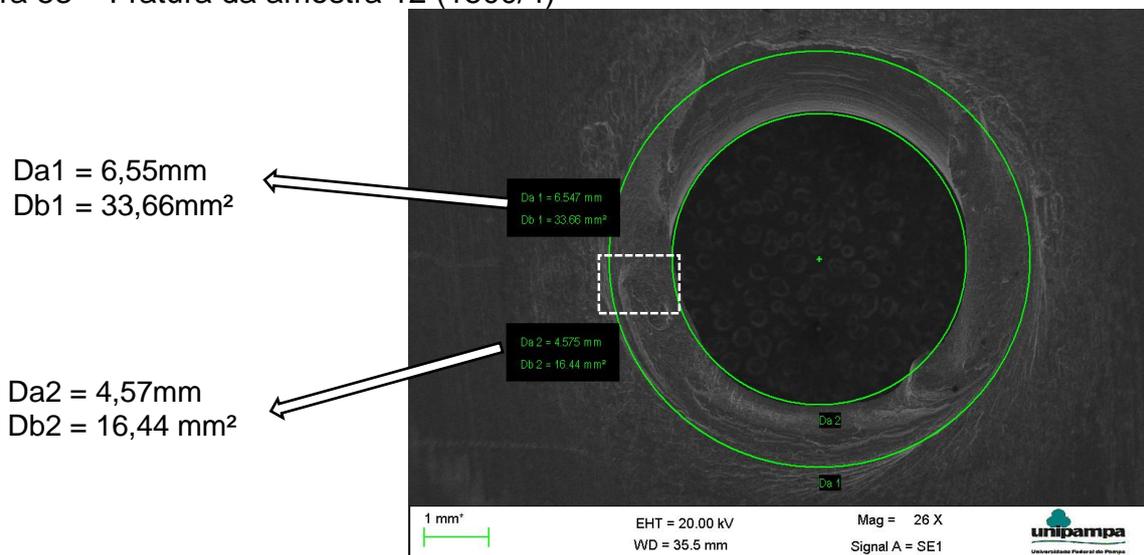
de cisalhamento, decorrente do deslizamento entre as chapas superior e inferior durante o ensaio. Outro ponto a ser observado é simetria entre os lados esquerdo e direito da fratura.

Figura 52 - Fratura da amostra 10 (1500/0)



Fonte: Próprio autor

Figura 53 – Fratura da amostra 12 (1500/4)



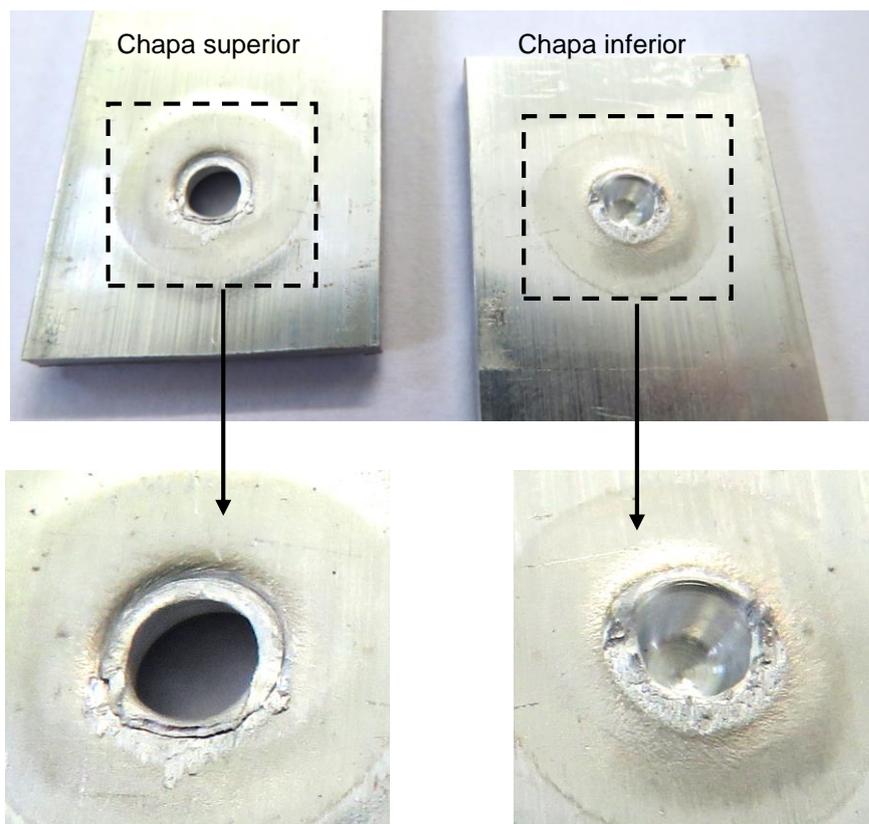
Fonte: Próprio autor

Diversos estudos comprovam que a área soldada é o fator mais importante, como é esperado, para a resistência ao cisalhamento de juntas FSSW. A resistência ao cisalhamento e a deformação de juntas FSSW crescem linearmente com o

aumento da região soldada (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014). (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006).

Todas as amostras ensaiadas no ensaio de cisalhamento falharam em um único modo de falha denominado *shear fracture*, ou seja, fratura cisalhante como mostra a Figura 54

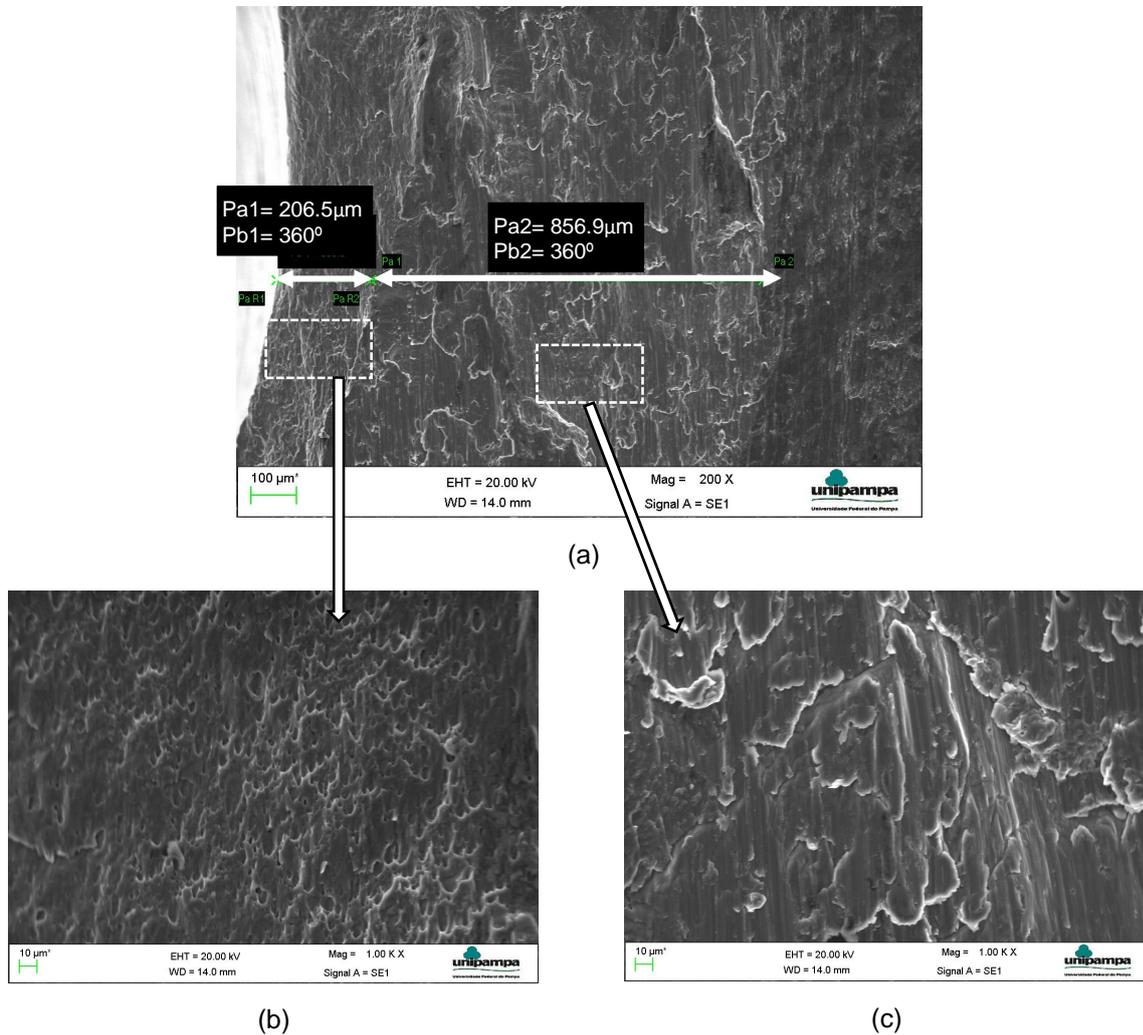
Figura 54 - Modo de falha - Fratura cisalhante



Fonte: Próprio autor

A Figura 55(a) mostra uma imagem ampliada da região destacada na Figura 52, onde se vê a interface da ZM com a zona parcialmente soldada. Na Figura 55(b) observam-se os dimples alongados, que indicam que falha ocorreu de forma dúctil com um estado de tensões misto de tração e cisalhamento no plano da figura, como esperado em função da solicitação do ensaio. Na Figura 55(c), se vê em detalhe de um ponto mais afastado da ZM. Neste ponto não se observam dimples, possivelmente devido a maior dureza e, conseqüentemente, comportamento mais frágil nessa região.

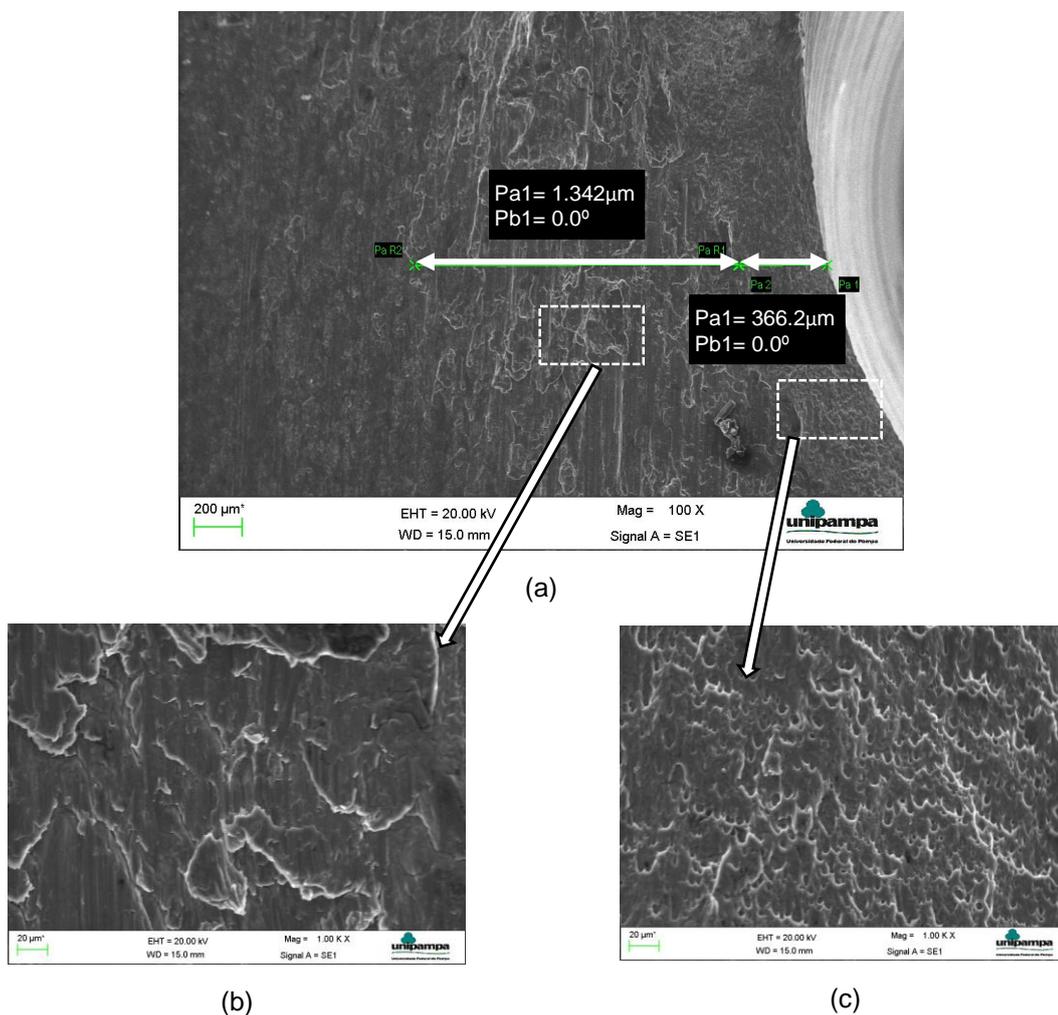
Figura 55 - (a) Zonas de transição da fratura da amostra 10 (b) dimples (c) fratura na zona parcialmente soldada



Fonte: Próprio autor

Na Figura 56(a) tem-se uma ampliação da região destacada na Figura 53. Na Figura 56(c) vê-se dimples e na Figura 56(b) o aspecto mais plano como visto para a amostra 10.

Figura 56 - (a) Zonas de transição da fratura da amostra 12 (b) fratura na zona parcialmente soldada (c) dimples



Fonte: Próprio autor

Comparando as imagens das Figura 55(a) e Figura 56(a) é possível notar o aumento na zona soldada (área aonde se tem os dimples) e na zona parcialmente soldada. Os micromecanismos de fratura de amostras discrepantes, como é o caso da Figura 55(b) e Figura 56(c), são os mesmos, ou seja, a diferença entre as duas amostras está na extensão das zonas e não nas suas características metalúrgicas. Essa observação está de acordo com os estudos de (PATHAK, BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2012), (SONG, KE, *et al.*, 2014), (TUTAR, AYDIN, *et al.*, 2014)

## 5.2 Aporte de Energia

O histórico (perfil) de temperatura para a combinação 18 (2500/4) está mostrado na Figura 32 enquanto a Figura 33 mostra o pico de temperatura em todas as amostras. Observa-se que o pico de temperatura cresce com o aumento da VR e TP, como também apresentado por (PATHAK, BANDYOPADHYAY, *et al.*, 2012). (PATEL, SEJANI, *et al.*, 2016), encontrou um pico de temperatura de 371°C em seu estudo com a liga 6082-T6 a 1500RPM. Neste trabalho o pico máximo de temperatura foi de aproximadamente 240°C, porém o tempo de soldagem foi menor que 10s enquanto no trabalho de (PATEL, SEJANI, *et al.*, 2016) foi de aproximadamente 50s. Embora o ponto de medição neste trabalho não seja dentro da ZM (por questões práticas), pode-se afirmar que não ocorreu fusão em nenhuma das soldas realizadas, pois o ponto de fusão da liga 6060-T5 é de aproximadamente 655°C (AALCO, 2017). Portanto, sabe-se que neste estudo estruturas metalúrgicas decorrentes de fusão não estão presentes. Cabe destacar que ocorrência de fusão localizada é um fenômeno possível no processo FSSW, daí a importância de medir os perfis de temperatura. Estudando FSSW com a liga Al 7075-T6 (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006) observaram em algumas soldagens temperaturas superiores à temperatura de fusão em pontos localizados.

Como era de esperar, as maiores temperaturas foram observadas em soldagens com maiores TP (ver Figura 33). Analisando os perfis de microdureza das amostras com maiores temperaturas, como por exemplo Figura 42, Figura 45 e Figura 48, nota-se uma maior planicidade quando comparado com as combinações com a mesma VR e com diferente TP. Observa-se que as combinações com TP de 4s apresentaram desvios padrões pequenos no ensaio de cisalhamento. Isso mostra que a maior homogeneização da temperatura nestas soldas contribuiu para comportamentos mecânicos mais homogêneos também, possivelmente por proporcionar maior uniformidade metalúrgica na solda. Em soldagens com TP de 2s obteve-se de 40 a 50° C a menos que aquelas com 4s, o que indica menor aporte térmico e justifica o perfil de microdureza mais heterogêneo. Esta maior heterogeneidade no perfil de microdureza indica o mesmo do ponto de vista metalúrgico e ajuda a explicar o maior desvio padrão nos ensaio de cisalhamento dessas amostras (Figura 29).

O perfil medido para a força axial durante a soldagem (Figura 35) foi semelhante ao encontrado por (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006) mostrado na Figura 5 (a) e por (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006). Esses dados de força axial, principalmente na sua repetibilidade, mostram que o equipamento utilizado (centro de usinagem Romi® D800) foi adequado para a produção das juntas FSSW estudadas neste trabalho. A força axial máxima para todas as amostras estão mostradas na Figura 36. Com rotação de 1500RPM foi necessária uma força axial de aproximadamente 10 kN para realizar a soldagem. Já para rotações de 2000 e 2500RPM a força axial máxima caiu para a casa de 8 kN. Isso é coerente com o esperado e mostrado nas medições de temperatura, pois com rotação mais alta o aporte térmico é maior e, conseqüentemente, a temperatura, o que aumenta a ductilidade do material. No estudo de (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006) notou-se que com rotações menores e maiores velocidades de penetração tem-se os maiores valores de força axial. Fixando a velocidade de penetração em 300mm/min (LATHABAI, PAINTER, *et al.*, 2006) encontrou valores de aproximadamente 11kN para 2000RPM. (GERLICH, CINGARA e NORTH, 2006) também encontrou valores e perfis de força parecidos com dos outros autores.

### 5.3 Considerações finais

Paralelamente aos ensaios de cisalhamento, para o método Taguchi e depois para o Fatorial Completo, buscou-se por ferramentas estatísticas para determinar a significância dos parâmetros em estudo e também por um modelo empírico que demonstrasse e fizesse previsões da resistência ao cisalhamento.

Na Figura 27 foram mostradas as curvas que são obtidas quando se aplica o método Taguchi. Observando o gráfico os melhores resultados para a resistência ao cisalhamento são VR 1500RPM, VP 120mm/min e TP 4s, o que ficou evidente tanto pelo gráfico da média das médias quanto pelo da média das razões S/R. Esta combinação indicada ótima, não foi abordada na matriz de ensaio gerada pelo método Taguchi. Portanto, foi feito um teste de confirmação para verificar a resistência ao cisalhamento para a combinação ótima. Uma amostra com a combinação 1500/120/4

foi soldada e posteriormente submetida a ensaio de cisalhamento. Os resultados estão mostrados na Tabela 22.

A resistência do cisalhamento da combinação ótima (amostra de confirmação) ficou muito próxima à da combinação 3 (1500/200/4) podendo-se dizer que estatisticamente não é possível diferenciar os dois levando-se em conta os erros estimados. Deve-se lembrar que o parâmetro VP, no intervalo estudado, não apresentou significância na tabela ANOVA (TABELA 9), tendo contribuição nula para a resistência ao cisalhamento. Entende-se o resultado da Tabela 22 como uma confirmação disso.

A Tabela 22 também mostra os valores calculados para a resistência ao cisalhamento de ambas as amostras. O cálculo foi realizado utilizando a Equação 4, obtida pelo modelo quadrático simplificado, a partir da superfície de resposta das variáveis para a resistência ao cisalhamento. Pode-se ver que a diferença (erro) entre os valores experimentais e os calculados foram de apenas 1,3% para a amostra de confirmação e de 5% para uma amostra de teste. Isso comprova a efetividade do modelo quadrático simplificado na previsão da resistência ao cisalhamento para combinações não extrapoladas.

Tabela 22 - Teste de confirmação da combinação ótima

Combinação	Parâmetros			Carga média experimental [N]	Carga média calculada [N]	Erro [%]
	VR (RPM)	VP	TP (s)			
<b>Amostra de confirmação</b>	1500	120	4	2256,97	2286,1	1,3
<b>Amostra teste</b>	1500	200	0	2277,0	2158,1	5

Fonte: Próprio autor

Esta abordagem caracterizada pela utilização da ANOVA para quantificar a contribuição de cada variável, a utilização do método Taguchi para a confecção de um modelo empírico e o teste de confirmação para comprovar uma combinação ótima está sendo amplamente utilizado no meio científico (MOHAMED, MANURUNG e BERHAN, 2015), (MUHAMMAD, MANURUNG, *et al.*, 2013), (MUHAMMAD, MANURUNG, *et al.*, 2012), (BILICI, 2011), (VIDAL e INFANTE, 2013),

(VENKATESWARLU e DAVIDSON, 2012), (BOZKURT e BILICI, 2013). Neste trabalho, como já era esperado, esta abordagem se mostrou bastante eficaz.

Para o modelo empírico do fatorial completo, que foi feito com apenas 2 parâmetros, já que o VP não mostrou significância no método Taguchi, se obteve um resumo do modelo com  $R^2$  de 96,13% (Tabela 11). Na tabela ANOVA (Tabela 9) o TP obteve uma contribuição de 57,69% sendo também, nesse novo experimento, o parâmetro mais significativo.

Com o objetivo de testar o modelo empírico do método Taguchi utilizou-se a equação obtida (Equação 4), para prever os resultados do experimento feito por fatorial completo. A Tabela 23 mostra os resultados experimentais da resistência ao cisalhamento, juntamente com os valores calculados a partir da equação 4. Observa-se que para as duas primeiras combinações (10 e 11) o erro foi alto (superior a 15%), o que, provavelmente, se deve ao fato desses pontos ficarem “fora” da curva da equação, ou seja, são pontos extrapolados em relação aos limites da equação. Foram testados outros modelos empíricos, porém com erros superiores a estes.

Tabela 23 - Validação do modelo empírico resultante da superfície de resposta do método Taguchi

Combinação	Parâmetros			Carga média experimental fatorial completo [N]	Carga calculada através do modelo de Taguchi [N]	Erro
	VR (RPM)	VP (fixo)	TP (s)			
<b>10</b>	1500	200	0	941,7	1352,5	-44%
<b>11</b>	1500	200	2	2410,1	1984,1	18%
<b>12</b>	1500	200	4	2470,2	2158,1	13%
<b>13</b>	2000	200	0	1247,5	1311,0	-5%
<b>14</b>	2000	200	2	1955,2	1821,4	7%
<b>15</b>	2000	200	4	2016,2	1874,2	7%
<b>16</b>	2500	200	0	1153,4	1269,5	-10%
<b>17</b>	2500	200	2	1738,1	1658,7	5%
<b>18</b>	2500	200	4	1696,6	1590,3	6%

Fonte: Próprio autor

Em termos estatísticos, a quantidade de pontos (combinações de soldagem) foi relativamente pequena nesse experimento (apenas nove). Em experimentos com um maior número de pontos a equação tenderia a mais homogênea e poderia proporcionar um melhor mapeamento do intervalo estudado resultando em uma

equação com menor erro e um melhor R<sup>2</sup>. Contudo, isso seria contrário à proposta deste trabalho que foi de realizar DOE com a finalidade, dentre outras, de otimizar o trabalho experimental sem comprometer a interpretação dos resultados. De qualquer modo, o modelo previsto foi considerado satisfatório. A confecção de um modelo empírico pode trazer economia durante a seleção de parâmetros, porém é sempre necessário um teste de confirmação.

Tabela 24 - Validação do modelo empírico resultante da superfície de resposta do fatorial completo

Combinação	Parâmetros			Carga média experimental fatorial completo [N]	Carga calculada através do modelo para fatorial completo [N]	Erro
	VR (RPM)	VP (fixo)	TP (s)			
<b>10</b>	1500	200	0	941,7	1114,2	-18%
<b>11</b>	1500	200	2	2410,1	2255,7	6%
<b>12</b>	1500	200	4	2470,2	2503,6	-1%
<b>13</b>	2000	200	0	1247,5	1114,2	11%
<b>14</b>	2000	200	2	1955,2	2033,8	-4%
<b>15</b>	2000	200	4	2016,2	2059,8	-2%
<b>16</b>	2500	200	0	1153,4	1114,2	3%
<b>17</b>	2500	200	2	1738,1	1811,9	-4%
<b>18</b>	2500	200	4	1696,6	1616,0	5%

Fonte: Próprio autor

Na superfície de resposta, do Fatorial Completo, aparentemente na rotação de 2500RPM o tempo de permanência ótimo estaria aproximadamente em 3s. Já para a rotação de 1500 RPM se tem uma relação linear entre os tempos de permanência de 2 e 4s, esses fenômenos podem ser observados na Figura 30 e Figura 31. Realizou-se duas soldagens de teste (Teste1 – 1500/200/3 e Teste 2 – 2500/200/3) para verificar os fenômenos observados na superfície de resposta. Os resultados estão mostrados na Tabela 25. O resultado do Teste 1 ficou ligeiramente abaixo da amostra 12, contrariando o previsto mas a pequena diferença pode ter sido mascarada pela margem de erro esperada. Já o Teste 2 mostrou uma resistência significativamente superior à da amostra 18, confirmando a previsão da melhoria proporcionada pelo TP de 3s.

Tabela 25 - Tabela das soldagens de teste para TP de 3s

Combinação	Parâmetros			Carga média experimental[N]	Diferença [N]
	VR (RPM)	VP	TP (s)		
<b>Teste 1</b>	1500	200	3	2432,86	- 37,34
<b>Combinação 12</b>	1500	200	4	2470,2	
<b>Teste 2</b>	2500	200	3	1983,39	+286,79
<b>Combinação 18</b>	2500	200	4	1696,6	

Fonte: Próprio autor

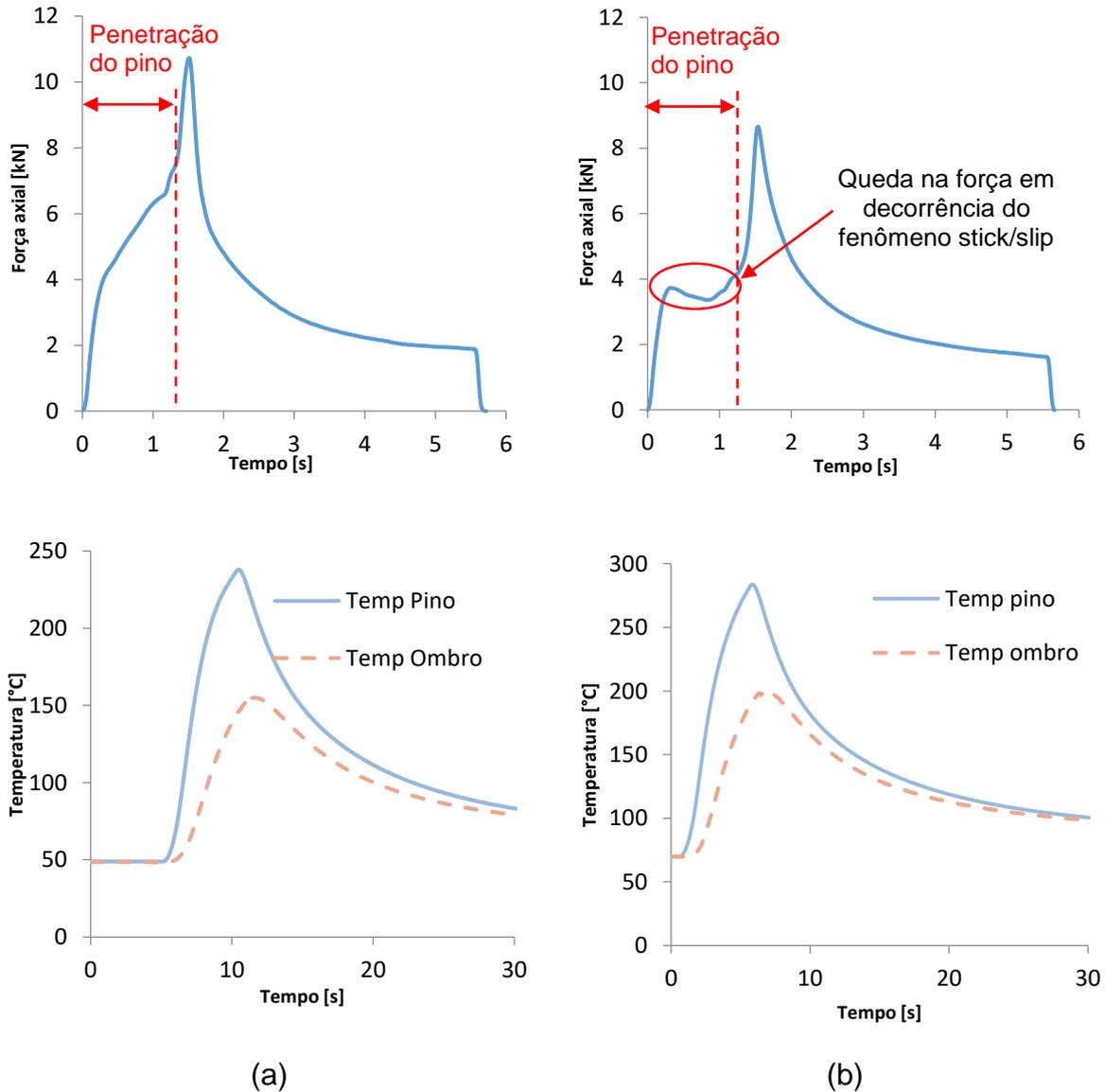
A investigação das razões para a tendência de queda na resistência para TP elevados extrapola os objetivos deste trabalho, mas possivelmente esteja relacionada aos fenômenos apresentados por (Rosendo, 2009).

Ainda observou-se neste trabalho que a velocidade de rotação, além de exercer efeito sobre o aporte térmico, também interfere na condição da interface entre ferramenta e material. Quando a temperatura aumenta muito (altas velocidades de rotação), a ductilidade do material aumenta a tal ponto que perde-se a adesão (*stick*) entre este e a ferramenta, fenômeno conhecido como patinamento (*slip*). A ocorrência do deslizamento leva à rápida queda da temperatura, reestabelecendo a adesão. Em soldas realizadas com altas rotações, tende a ocorrer a transição entre adesão e patinamento até o final do processo, fenômeno que se chama *stick/slip*. A ocorrência do fenômeno *stick/slip* fica evidente ao analisar as curvas da força axial monitorada ao longo do tempo durante as soldagens. A Figura 57 mostra a curva força x tempo para uma amostra realizada a 1500RPM (Figura 57a) e para outra realizada a 2500RPM (Figura 57b). As soldas realizadas com 2000RPM e 2500RPM, apresentam instabilidade da curva força x tempo no trecho correspondente à penetração do pino, em alguns casos mantendo-se constante ou até diminuindo. Já para as soldas realizadas a 1500RPM, a força aumenta continuamente durante a penetração da ferramenta, evidenciando uma condição plena de adesão entre a ferramenta e o material.

A condição de adesão é necessária na soldagem FSSW pois dela decorre a deformação plástica e, conseqüentemente, o fluxo de material que promoverá a soldagem. Isso ajuda a explicar o melhor comportamento mecânico das soldas produzidas com 1500RPM e o porquê do perfil de microdureza ter sido mais plano para estas amostras (área soldada maior). Por fim, percebe-se que o fenômeno

*stick/slip* estabelece um valor limite para a velocidade de rotação. No caso do presente trabalho, o limite para a velocidade de rotação aparentemente encontra-se entre 1500 e 2000RPM.

Figura 57 - Para as velocidades de rotação de 2000 e 2500RPM observou-se a ocorrência do fenômeno *stick/slip*, que leva à redução da área soldada.



## 6 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feito um estudo sobre soldagem FSSW em juntas sobreposta com a liga AA6060-T5. Avaliação das características mecânicas foi o objetivo principal desse trabalho. Utilizou-se diversos ensaios mecânicos e metalúrgicos para encontrar correlações entre as variáveis de entrada e as respostas.

O centro de usinagem CNC Romi D800 se mostrou capaz e confiável para a produção de soldas FSSW.

O método Taguchi comprovou ser eficaz para otimização de parâmetros de soldagem FSSW, porém para um estudo mais detalhado do processo indica-se um fatorial completo.

A modelagem de superfície de resposta se mostrou satisfatória para projeção de novos resultados, indicando os parâmetros que combinados resultam nas melhores respostas.

A ordem de importância dos parâmetros estudados, pelo método Taguchi é: Tempo de permanência – Velocidade de Rotação e Velocidade de Penetração. O tempo de permanência foi o fator mais importante para a resistência ao cisalhamento tendo uma contribuição de aproximadamente 60%.

A melhor velocidade de rotação para soldagem foi de 1500RPM e o parâmetro velocidade de penetração não tem significância, no intervalo estudado, no método Taguchi.

Para as velocidades de rotação de 2000 e 2500RPM observou-se a ocorrência do fenômeno *stick/slip*, que leva à redução da área soldada.

A velocidade de rotação é limitada pelo fenômeno *stick/slip*, devendo ser selecionada de modo a garantir adesão (*stick*) durante todo o processo de soldagem.

A força axial de soldagem mostrou um perfil parecido com os diversos estudos apresentados assim como o perfil de temperatura do processo, comprovando a qualidade do processo de soldagem.

Na análise com o Fatorial Completo o parâmetro tempo de permanência também foi o mais significativo.

Os melhores resultados de cisalhamento deram-se em amostras com perfis de microdureza mais plano e com durezas menores que do material base na zona de mistura.

O aspecto da fratura nas amostras mais discrepantes em termos de resistência ao cisalhamento foi o mesmo, indicando os mesmos micromecanismos envolvidos. Já a área da seção fraturada é diferente e mostra boa correlação com a resistência.

O modelo quadrático simplificado se mostrou eficaz para prever a resistência ao cisalhamento para combinações de soldagem que não extrapolam as faixas testadas.

## 7 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com os aprendizados e conclusões desse trabalho, sugere-se para trabalhos futuros a realização dos seguintes estudos:

- Analisar o comportamento das juntas soldadas com velocidades de rotação menores de 1500RPM;
- Utilização de maiores tempos de permanência associados com altas velocidades de penetração, buscando aumentar a produtividade aliado com boa resistência mecânica;
- Utilizar o método Taguchi para escolher os parâmetros e intervalos a serem estudados. Após a escolha proceder com um outro planejamento experimental e fazer a comparação dos métodos;
- Realizar uma análise microestrutural da seção transversal da junta soldada, buscando explicações para as transformações microestruturais;
- Analisar o comportamento mecânico das juntas soldadas sob solicitação de fadiga.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AALCO. [http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6060-T5--Extrusions\\_144.ashx](http://www.aalco.co.uk/datasheets/Aluminium-Alloy-6060-T5--Extrusions_144.ashx). **http:** //www.aalco.co.uk, 2017. Acesso em: 11 jul. 2017.

AL-MARAHLEH , G. Effect of heat Treatment Parameters on Distribution and Volume Fraction of MgSi in the Structural Al6063 Alloy. **American Journal of Applied Science**, 2006. 1819 - 1823.

BABU, S. et al. Microstructures and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welded Aluminum Alloy AA2014. **ASM International**, 2012. 71-84.

BADARINARAYAN, H. et al. Effect of tool geometry on hook formation and static strenght of friction stir spot welded aluminum 5754-O sheets. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2009. 814-823.

BADARINARAYAN, H.; YANG, Q.; OKAMOTO, K. Effect of weld orientation on static strength and failure mode of friction stir stitch welds in lap-shear specimens of aluminium 6022-T4 sheets. **Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures**, 2010.

BILICI, M. K. Application of taguchi approach to optimize friction stir spot welding parameters of polypropylene. **Materials and Design**, v. 35, p. 113-119, 2011. ISSN 0261-3069.

BOZKURT, Y.; BILICI, M. K. Application of taguchi approach to optimize of FSSW parameters on joint properties of dissimilar AA2024-T3 and AA5754-H22 aluminum alloy. **Materials and Design**, v. 51, p. 513-521, 2013. ISSN 0261-3069.

BUFFA, G. et al. Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties. **Materials Science and Engineering A**, 519, Abril 2009. 19-26.

DONG, P.; SUN, D.; LI, H. Natural aging behaviour of friction stir welded 6005A-T5 alluminium alloy. **Materials science and Engeneering Aa**, 2013. 29-35.

FEREIDUNI, E.; MOVAHEDI, M.; KOKABI, A. H. Aluminum/stell joints made by an alternative friction stir spot weldinf process. **Journal of Materials Processing Technology**, 224, 2015. 1-10.

FU, R.-D. et al. Effect of welding heat input and post-welding natural aging on hardness of stir zone for friction stir welded 2024-T3 aluminum alloy thin-sheet. **Materials Science and Engineering A**, 2013. 319 - 324.

GERLICH, A.; CINGARA, A.; NORTH, T. H. Stir Zone Microstructure and Strain Rate during Al 7075 - T6. **Metallurgical and Materials Transactions A**, 37A, September 2006. 2773-2786.

HANDBOOK, A. M. **Properties and selection: Nonferrous alloys and special purpose materials**. 2. ed. Ohio: ASM International, v. 2, 1992.

HIRASAWA, S. et al. Analysis of effect of tool geometry on plastic flow during friction stir spot welding using particle method. **Journal of Materials Processing Technology**, Japan, 2010. 1455-1463.

J.Y.CAO et al. Hook formation and mechanical properties of friction spot welding in alloy 6061-T6. **Journal of Materials Processing Technology**, 2016. 254-262.

JONCKHEERE, C.; MEESTER, B. D. Fracture and mechanical properties of friction stir spot welds in 6063-T6 aluminum alloy. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2012. 569-575.

LATHABAI, S. et al. Friction spot joining of an extruded Al - Mg - Si alloy. **Scripta Materialia**, Woodville, v. 55, p. 899-902, 2006.

MERZOUG, M. et al. Parametric studies of the process of friction spot stir welding of aluminium 6060-T5 alloys. **Materials and Design**, 31, 2010. 3023-3028.

MITLIN, D. et al. Structure-properties relations in spot friction welded 6111 aluminum. **Materials Science and Engineering**, 2006. ISSN 0921-5093.

MOHAMED, M. A.; MANURUNG, Y. H.; BERHAN, M. N. Model development for mechanical properties and weld quality class of friction stir welding using multi-objective Taguchi method and response surface methodology. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2015.

MUHAMMAD, N. et al. Optimization and modeling of spot welding parameters with simultaneous multiple response consideration using multi - objective Taguchi method and RSM. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2012. 2365-2370.

MUHAMMAD, N. et al. Model development for quality features of resistance spot welding using multi-objective Taguchi Method and response Surface Methodology. **Journal Manafatural**, 2013. 1175 - 1183.

PAIDAR, M. et al. Effects of the tool rotation speed and shoulder penetration depth on mechanical properties and failure modes of friction stir spot welds of aluminum 2024-T3 sheets. **Journal of mechanical science and technology**, Tehran, 2014. 4893-4898.

PAIDAR, M.; SARAB, M. L. Friction stir spot welding of 2024 - T3 aluminum alloy with SiC nanoparticles. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 30, 2016. 365-370.

PATEL, V. V. et al. Effect of Tool Rotation Speed on Friction Stir Spot Welded AA5052-H32 and AA6082-T6 Dissimilar Aluminum Alloys. **Metallography, Microstructure and analysis**, 2016.

PATHAK, N. et al. Microstructure and mechanical performance of friction stir spot-welded Aluminum-5754 sheets. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 2012. 131-144.

PAYTON, L. N. **Metal Cutting Theory and Friction Stir Welding**. Trends in Welding Research. [S.l.]: [s.n.]. 2005. p. 257-260.

ROSENDO, T. D. S. **Estudo do Desempenho Mecânico de Soldas(s) Ponto por Fricção (FSPW) da liga AA6181-T4**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 113. 2009.

ROSENDO, T. et al. Mechanical performance of AA6181 refill friction spot welds under Lap shear tensile loading. **Fatigue & Fracture of Engineering Materias & Structures**, 38, 2015. 1443 - 1455.

SENTHILRAJA, R. Optimization of the parameters of friction stir welding for AZ91D magnesium alloy using the taguchi design. **Materials Science**, 51, 2015. 180-187.

SILVA, A. C. F.; BRAGA, D. F.; FIGUEIREDO, A. V. Ultimate tensile strength optimization of different FSW aluminium alloy joints. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Fevereiro 2015. 805-814.

SONG, X. et al. Effect of plunge speed on hook geometries and mechanical properties in friction stir spot welding of 6061 - T5. **International Journal Advanced Manufacturing Technology**, 71, 2014. 2003 - 2010.

SU, P. et al. Energy Generation and Stir Zone Dimensions in Friction Stir Spot Welds. **SAE International**, 2006.

SU, P. et al. Energy utilisation and generation during friction stir spot welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, p. 163-169, 2006.

TIER, M. D. et al. The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminum welds. **Journal of Materials Processing Technology**, 213, 2013. 997 - 1005.

TUTAR, M. et al. The optimisation of process parameters for friction stir spot welded AA3003-H12 aluminium alloy using a Taguchi orthogonal array. **Materials and Design**, 63, 2014. 789-797.

VENKATESWARLU, G.; DAVIDSON, M. J. Taguchi Optimisation of Friction Stir Processing Parameters to Achieve Maximum Tensile Strength of Mg AZ31B Alloy. **Indian Institute of Metals**, 2012.

VIDAL, C.; INFANTE, V. Optimization of FS Welding Parameters for Improving Mechanical Behavior of AA 2024-T351 Joints Based on Taguchi Method. **ASM International**, n. 1059-9495, 2013. 2261-2270.

YUAN, W. et al. Effect of Tool Design and Process Parameters on Properties of Al Alloy 6016 Friction Stir Spot welds. **Journal Materials Processing and Technology**, 2011. 972-977.

**ANEXO I**

Programa utilizado para as soldagens dos corpos de prova:

Linguagem FANUC, Fresadora CNC ROMI® D800

```
N10 G91 ;  
N20 S1500 M3 ;  
N30 G01 Z-6 F120 ;  
N40 G04 P4000 ;  
N50 G01 Z1 F120 ;  
N60 G0 Z150 ;  
N70 M30;
```

Linha N10 – Definição de programa para coordenadas incrementais

Linha N20 – Definição de rotação de 1500RPM (S1500) e sentido horário (M3)

Linha N30 – Definição de interpolação linear (G01), comando para a ferramenta penetrar 6mm (Z-6) a um avanço de 120mm/min (F120)

Linha N40 – Função auxiliar para *Dwell Time* (G04) e tempo de permanência de 4s (P4000)

Linha N50 – Definição de interpolação linear (G01), comando para a ferramenta sair 1 mm (Z1) a um avanço de 120mm/min (F120)

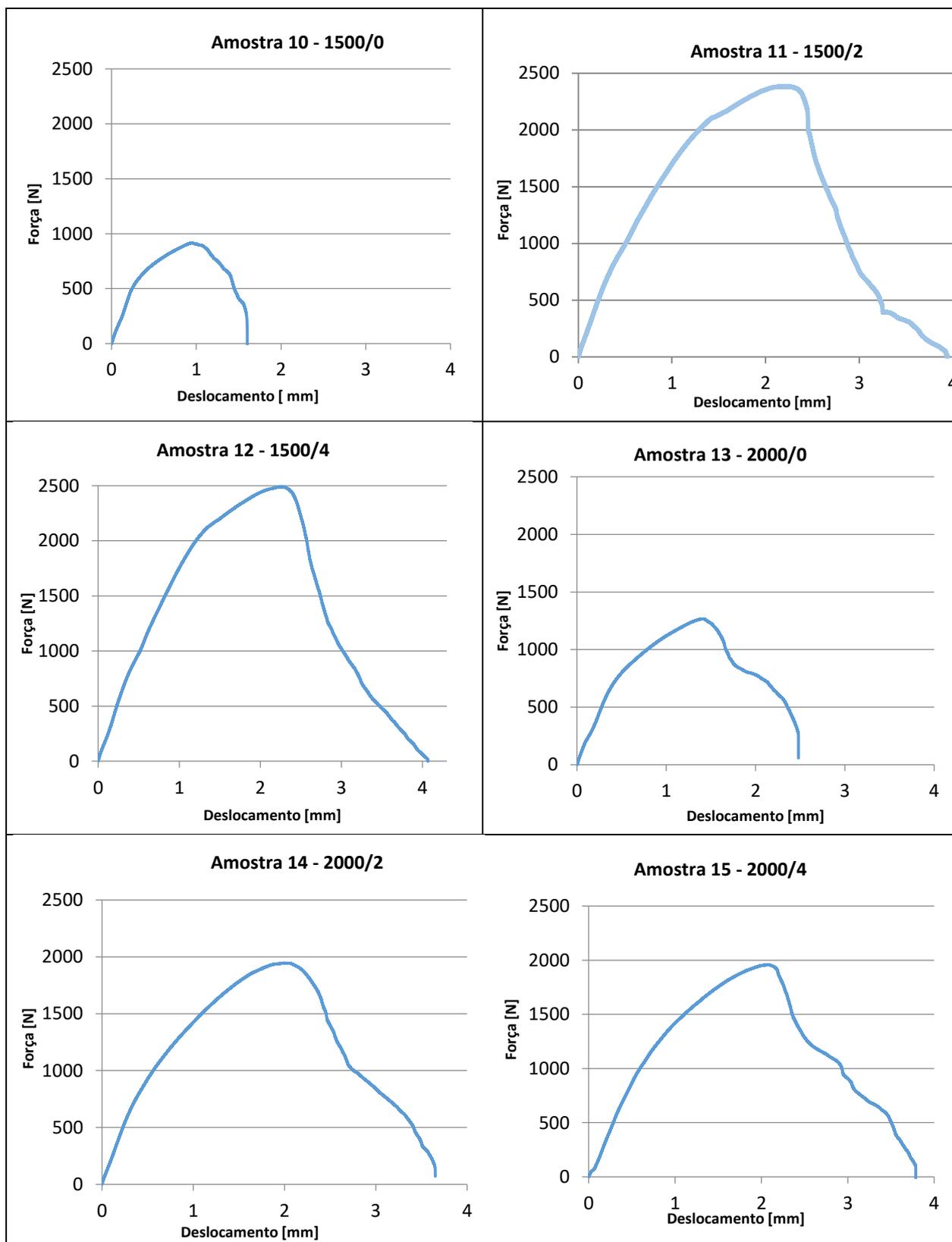
Linha N60 – Movimento rápido (G0) sendo retirada 150mm da posição anterior (Z150)

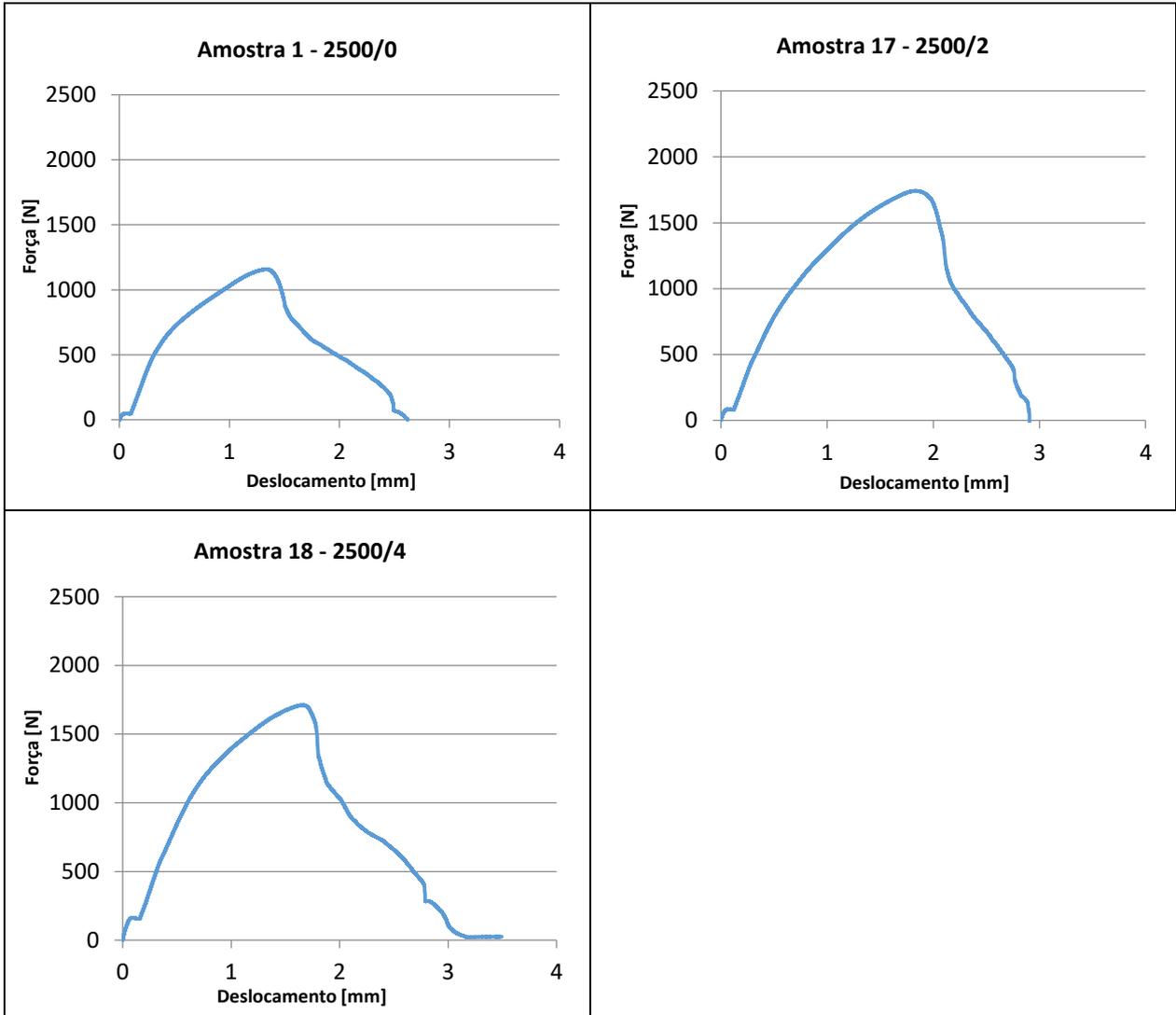
Linha N70 – Fim de operação (M30)

Obs: Para esse experimento apenas mudou-se as seguintes variáveis no programa: velocidade de rotação (S), o avanço (F) e o tempo de permanência (P) conforme a matriz de parâmetros.

**ANEXO II**

Ensaio de cisalhamento – Amostra 10 – 18 (Fatorial completo)





## ANEXO III

Perfil de força axial e temperatura no processo de soldagem – Amostra 10 – 18

